

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y FLUIDOS



TRABAJO FIN DE GRADO

# **Diseño y análisis de una planta termosolar con calentamiento directo de gases en receptor central.**

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Junio 2014

Autor: Álvaro López Barbero.

Tutor: Antonio Acosta Iborra.





## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por darme esta oportunidad y ayudarme a ser  
quien soy.

A mi hermano, para que encuentre lo que realmente le ilusiona.

A mi abuelo, que se habría sentido muy orgulloso. Y a mi  
abuela, porque como sus nietos no hay ninguno.

Y a todos los que han leído estas líneas y las han cambiado a  
mejor.





# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>AGRADECIMIENTOS .....</b>                                | <b>3</b>  |
| <b>ÍNDICE .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>TABLA DE ILUSTRACIONES .....</b>                         | <b>9</b>  |
| <b>NOMENCLATURA .....</b>                                   | <b>14</b> |
| <b>RESUMEN.....</b>   | <b>16</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                | <b>19</b> |
| 1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO .....                | 19        |
| 1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO .....                             | 21        |
| 1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....                             | 23        |
| <b>2. ENERGÍA SOLAR.....</b>                                | <b>25</b> |
| 2.1 INTRODUCCIÓN A LAS ENERGÍAS RENOVABLES.....             | 25        |
| 2.2 CENTRALES TERMOSOLARES .....                            | 32        |
| 2.2.1 Centrales con receptores cilíndrico parabólicos ..... | 34        |
| 2.2.2 Centrales con colectores lineales tipo Fresnel.....   | 38        |
| 2.2.3 Centrales con disco parabólico Stirling.....          | 41        |
| 1.2.4 Centrales con receptor central.....                   | 44        |
| 2.3 CENTRALES TÉRMICAS DE RECEPTOR CENTRAL EN ESPAÑA.....   | 50        |
| 1.3.1 PS10 .....  | 50        |
| 1.3.2 PS20 .....  | 52        |
| 1.3.3 Gemasolar.....  | 53        |
| <b>3. TEORÍA .....</b>                                      | <b>57</b> |
| 3.1 CICLO DE POTENCIA .....                                 | 57        |
| 3.1.1 El compresor .....                                    | 59        |
| 3.1.2 El receptor .....                                     | 64        |
| 3.1.3 La turbina .....                                      | 65        |
| 3.2 EL RECEPTOR.....  | 69        |
| 3.3 EL CAMPO DE HELIOSTATOS .....                           | 78        |
| <b>4. RESULTADOS DEL DISEÑO .....</b>                       | <b>89</b> |
| 4.1 RESULTADOS DEL CICLO .....                              | 89        |
| 4.1.1 El compresor .....                                    | 100       |



|                     |   |            |
|---------------------|---|------------|
| 4.1.2               | <i>El receptor</i> .....                  | 102        |
| 4.1.3               | <i>La turbina</i> .....                   | 103        |
| 4.2                 | RESULTADOS DEL RECEPTOR.....              | 106        |
| 4.3                 | RESULTADOS DEL CAMPO DE HELIOSTATOS ..... | 114        |
| <b>5.</b>           | <b>ANÁLISIS ECONÓMICO</b> .....           | <b>119</b> |
| 5.1                 | INVERSIÓN DE LA PLANTA .....              | 119        |
|                     | <i>Campo de heliostatos</i> .....         | 119        |
|                     | <i>Torre</i> .....                        | 121        |
|                     | <i>Isla de potencia</i> .....             | 121        |
|                     | <i>Terreno</i> .....                      | 122        |
|                     | <i>Inversión total</i> .....              | 123        |
| 5.2                 | INGRESOS DEL PROYECTO .....               | 125        |
|                     | <i>Precio del kWh</i> .....               | 125        |
| <b>6.</b>           | <b>ANÁLISIS AMBIENTAL</b> .....           | <b>127</b> |
|                     | EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....        | 127        |
| <b>7.</b>           | <b>COSTE DEL PROYECTO</b> .....           | <b>129</b> |
| <b>8.</b>           | <b>CONCLUSIONES</b> .....                 | <b>131</b> |
| 8.1                 | RESUMEN DE RESULTADOS .....               | 131        |
|                     | <i>Ciclo de potencia</i> .....            | 131        |
|                     | <i>Receptor</i> .....                     | 132        |
|                     | <i>Campo de heliostatos</i> .....         | 134        |
|                     | <i>Análisis económico</i> .....           | 135        |
|                     | <i>Análisis ambiental</i> .....           | 137        |
| 8.2                 | CONCLUSIONES FINALES .....                | 138        |
| 8.3                 | CRÍTICA A LOS RESULTADOS .....            | 140        |
| 8.4                 | LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO .....           | 142        |
| <b>APÉNDICE 1</b>   | .....                                     | <b>144</b> |
| <b>APÉNDICE 2</b>   | .....                                     | <b>146</b> |
| <b>APÉNDICE 3</b>   | .....                                     | <b>154</b> |
| <b>APÉNDICE 4</b>   | .....                                     | <b>158</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> | .....                                     | <b>162</b> |









## TABLA DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1: Gráfico del consumo energético español en 2010 (Fuente: Propia).   | 23 |
| Ilustración 2: Proporción de energías renovables en la producción de energía eléctrica de los países de la UE en el año 2012 (Fuente: Wikipedia).                         | 27 |
| Ilustración 3: Disponibilidad de energías renovables frente al consumo de energía actual (Fuente: <a href="http://jmirez.wordpress.com">http://jmirez.wordpress.com</a> ) | 28 |
| Ilustración 4: Mapa de la radiación solar recibida (Fuente: Wikipedia).   | 29 |
| Ilustración 5: Posible infraestructura de provisión de energía a Europa, el Medio Oriente y África del Norte (Fuente: Desertec Foundation).                               | 30 |
| Ilustración 6: Resultados del potencial disponible en nuestro país (Fuente: IDAE).  | 31 |
| Ilustración 7: Tipos de tecnologías de concentración solar (Fuente: TFG Ascensión Aynat Piquer).  | 33 |
| Ilustración 8: Esquematización de un sistema de colector cilíndrico parabólico (Fuente: <a href="http://www.afinidadelectrica.com">www.afinidadelectrica.com</a> )        | 34 |
| Ilustración 9: Tabla de centrales de receptor cilíndrico parabólico en España (Fuente: Wikipedia).  | 38 |
| Ilustración 10: Representación de Colectores Fresnel (Fuente: CNIM).  | 39 |
| Ilustración 11: Tabla de centrales con colectores lineales tipo Fresnel en España (Fuente: Wikipedia).  | 41 |
| Ilustración 12: Disco parabólico con motor Stirling. (Fuente: Wikipedia).   | 42 |
| Ilustración 13: Planta de Gemasolar (Fuente: <a href="http://www.torresolenergy.com">www.torresolenergy.com</a> ).  | 44 |
| Ilustración 14: Distribuciones del campo de heliostatos (Fuente: <a href="http://www.crcnetbase.com">www.crcnetbase.com</a> ).  | 45 |
| Ilustración 15: Diagrama T-s de un ciclo Brayton ideal (Fuente: <a href="http://eribera_bo.tripod.com">eribera_bo.tripod.com</a> ).                                       | 46 |
| Ilustración 16: Esquema de un ciclo Brayton (Fuente: Moran y Shapiro, Fundamentos de termodinámica y técnica).  | 46 |
| Ilustración 17: Diagrama T-s de un ciclo Brayton real (Fuente: Wikipedia).  | 47 |
| Ilustración 18: Diagrama T-s de un ciclo Rankine ideal (Fuente: Moran y Shapiro, Fundamentos de termodinámica y técnica).   | 48 |
| Ilustración 19: Esquema de los componentes de un ciclo Rankine (Fuente: Moran y Shapiro, Fundamentos de termodinámica y técnica).   | 48 |
| Ilustración 20: Diagrama T-s de un ciclo Rankine (Fuente: Universidad Carlos III de Madrid).  | 49 |
| Ilustración 21: Tabla de centrales con receptor central en España (Fuente: Wikipedia).  | 49 |
| Ilustración 22: Ubicación de Sanlúcar la Mayor (Fuente: Google Maps).   | 50 |
| Ilustración 23: Central termosolar PS10 (Fuente: Google Maps).  | 51 |
| Ilustración 24: Las centrales termosolares PS10 y PS20 (Fuente: Google Maps).   | 52 |
| Ilustración 25: Planta termosolar PS20 (Fuente: Daniel G.M. flickr).  | 53 |
| Ilustración 26: Localización de Gemasolar en España (Fuente: Google Maps).  | 54 |
| Ilustración 27: Gemasolar vista desde arriba (Fuente: Google Maps).   | 55 |
| Ilustración 28: Planta termosolar Gemasolar (Fuente: Torresol Energy).  | 55 |
| Ilustración 30: Propiedades del aire atmosférico (Fuente: Propia).  | 59 |



|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 31: Receptor de cavidad (Fuente: Q. Yu et al. Solar Energy).....   | 69  |
| Ilustración 32: Receptor tubular (Fuente: Q. Yu et al. Solar Energy).....  | 69  |
| Ilustración 33: Receptor con metales fundidos (Fuente: Q. Yu et al. Solar Energy).<br>.....  | 69  |
| Ilustración 34: Pérdidas de nuestro receptor (Fuente: TFG Alfonso Gómez<br>Cristóbal).....   | 74  |
| Ilustración 35: Clasificación de la convección según el número de Grashof y el de<br>Reynolds .....                                  | 75  |
| Ilustración 36: Eficiencia de los heliostatos según su situación (Fuente: TFG Andrés<br>Carrillo).....                               | 79  |
| Ilustración 37: Distribuciones del campo de heliostatos simplificadas y real<br>(Fuente: TFG Hugo Joga). ....                        | 79  |
| Ilustración 38: Distancia de cada anillo a la torre (Fuente: Propia).....  | 81  |
| Ilustración 39: Número de heliostatos por anillo (Fuente: Propia). ....  | 82  |
| Ilustración 40: Número total de heliostatos en el campo según el número de anillos<br>(Fuente: Propia). ....                         | 82  |
| Ilustración 41: Simulación del campo de heliostatos (Fuente: TFG Hugo Joga). ....  | 83  |
| Ilustración 42: Representación de la atenuación atmosférica (Fuente: Google<br>Image).....   | 84  |
| Ilustración 43: Representación de las pérdidas por sombras (Fuente: Google<br>Image).....  | 85  |
| Ilustración 44: Representación de las pérdidas por bloqueo (Fuente: Google<br>Image).....  | 85  |
| Ilustración 45: Turbina SGT-800 (Fuente: Siemens).....   | 90  |
| Ilustración 46: Tabla de propiedades de la turbina SGT-800 (Fuente: Siemens). ...  | 91  |
| Ilustración 47: Evolución del rendimiento de la turbina con respecto al<br>rendimiento del compresor (Fuente: Propia).....           | 97  |
| Ilustración 48: Evolución del rendimiento de la turbina con respecto al<br>rendimiento del compresor (Fuente: Propia).....           | 98  |
| Ilustración 49: Valores del rendimiento isentrópico de la turbina y del compresor<br>seleccionados (Fuente: propia). ....            | 99  |
| Ilustración 50: Rendimientos isentrópicos de la turbina y del compresor (Fuente:<br>Propia).....                                     | 99  |
| Ilustración 51: Propiedades del aire el 10 de Julio en Sevilla (Fuente:<br>eltiempo24.es). ....                                      | 100 |
| Ilustración 52: Diámetro del tubo de admisión (Fuente: Propia). ....   | 100 |
| Ilustración 53: Diámetro para introducir el aire en el compresor (Fuente: Propia).<br>.....  | 100 |
| Ilustración 54: Propiedades de entrada al compresor (Fuente: Propia). ....   | 101 |
| Ilustración 55: Perdida de carga en la entrada del compresor (Fuente: Propia). .   | 101 |
| Ilustración 56: Propiedades a la salida del compresor (Fuente: Propia).....  | 101 |
| Ilustración 57: Rugosidad del acero (Fuente: siafa.com).....   | 101 |
| Ilustración 58: Propiedades de entrada al receptor (Fuente: Propia). ....  | 102 |
| Ilustración 59: Pérdida de carga del compresor al receptor (Fuente: Propia).....   | 102 |
| Ilustración 60: Espuma de carburo de silicio, y espuma de aluminio (Fuente<br>Applied Thermal Engineering 31, Villafán-Vidales)..... | 102 |
| Ilustración 61: Propiedades de los materiales porosos (Fuente: Propia). ....   | 103 |
| Ilustración 62: Perdida de carga del receptor (Fuente: Propia). ....   | 103 |



|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 63: Presión a la salida del receptor (Fuente: Propia).....  | 103 |
| Ilustración 64: Presión de entrada a la turbina (Fuente: Propia). ....  | 104 |
| Ilustración 65: Pérdida de carga del receptor hasta la turbina (Fuente: Propia)..                             | 104 |
| Ilustración 66: Temperatura a la entrada de la turbina (Fuente: Propia).....                                  | 104 |
| Ilustración 67: Temperatura a la salida de la turbina (Fuente: Propia).....                                   | 104 |
| Ilustración 68: Presión a la salida de la turbina (Fuente: Propia).....                                       | 104 |
| Ilustración 69: Presión de salida de los gases (Fuente: Propia). ....   | 105 |
| Ilustración 70: Diagrama T-s del ciclo de potencia (Fuente: Propia). ....                                     | 105 |
| Ilustración 71: Calor que se necesita transmitir al fluido (Fuente: Propia).....                              | 106 |
| Ilustración 72: Números de Reynolds y Prandtl para la convección (Fuente:<br>Propia).....                     | 106 |
| Ilustración 73: Número de Nusselt para la convección (Fuente: Propia).....                                    | 107 |
| Ilustración 74: Coeficiente de transferencia de calor debido a la convección (Fuente:<br>Propia).....         | 107 |
| Ilustración 75: Calor por unidad de volumen transferido por convección al fluido<br>(Fuente: Propia). ....    | 107 |
| Ilustración 76: Volumen necesario del receptor (Fuente: Propia). ....   | 107 |
| Ilustración 77: Dimensiones del receptor (Fuente: Propia).....  | 107 |
| Ilustración 78: Volumen necesario del receptor (Fuente: Propia). ....   | 108 |
| Ilustración 79: Desarrollo de la temperatura del fluido térmico dentro del receptor<br>(Fuente: Propia). .... | 109 |
| Ilustración 80: Diferencia de temperaturas entre la cubierta y el material poroso<br>(Fuente: Propia). ....   | 110 |
| Ilustración 81: Temperatura exterior del receptor (Fuente: Propia).....                                       | 110 |
| Ilustración 82: Números de Reynolds y Grashof para la convección (Fuente:<br>Propia).....                     | 110 |
| Ilustración 83: Comparación del Grashof con el Reynolds (Fuente: Propia). ....                                | 111 |
| Ilustración 84: Número de Nusselt para la convección (Fuente: Propia).....                                    | 111 |
| Ilustración 85: Coeficiente de transferencia de calor debido a la convección<br>(Fuente: Propia). ....        | 111 |
| Ilustración 86: Calor perdido por convección (Fuente: Propia).....  | 111 |
| Ilustración 87: Calor perdido por radiación (Fuente: Propia).....   | 112 |
| Ilustración 88: Calor total que necesito en el receptor (Fuente: Propia).....                                 | 112 |
| Ilustración 89: Distribución del calor concentrado en el receptor (Fuente: Propia).<br>.....                  | 112 |
| Ilustración 90: Radiación directa el 10 de Julio (Fuente: Agencia Andaluza de<br>Energía).....                | 114 |
| Ilustración 91: Radiación directa a mediodía (Fuente: Propia). ....   | 114 |
| Ilustración 92: Valores de los rendimientos (Fuente: Propia). ....  | 115 |
| Ilustración 93: Rendimiento del receptor (Fuente: Propia).....  | 115 |
| Ilustración 94: Área del receptor (Fuente: Propia). ....  | 115 |
| Ilustración 95. Distribución del campo de heliostatos (Fuente: Propia). ....                                  | 116 |
| Ilustración 96: Calor total que concentramos en el receptor (Fuente: Propia). ....                            | 117 |
| Ilustración 98: Desglose del precio del campo de heliostatos (Fuente: Propia)....                             | 120 |
| Ilustración 99: Precio del campo de heliostatos (Fuente: Propia).....   | 120 |
| Ilustración 100: Desglose del precio de la torre (Fuente: Propia).....  | 121 |
| Ilustración 101: Desglose de precios de la Isla de Potencia (Fuente: Propia). ....                            | 122 |
| Ilustración 102: Precio de la Isla de Potencia (Fuente: Propia).....  | 122 |



|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 103: Precio del terreno necesario (Fuente: Propia).....  | 123 |
| Ilustración 104: Desglose de precios de la planta termosolar (Fuente: Propia)...   | 123 |
| Ilustración 105: Precio total de la Planta Termosolar (Fuente: Propia). ....   | 124 |
| Ilustración 106: Tarifas de régimen especial según el Real Decreto 661/2007 de 25<br>de mayo (Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio). .... | 125 |
| Ilustración 107: Energía producida anualmente (Fuente: Propia).....  | 127 |
| Ilustración 108: Energía eléctrica producida anualmente (Fuente: Propia).....  | 128 |
| Ilustración 109: Toneladas de CO <sub>2</sub> no emitidas (Fuente: Propia).....  | 128 |
| Ilustración 110: Presupuesto del proyecto (Fuente: Propia).....  | 130 |
| Ilustración 111: Diagrama Ts del ciclo (Fuente: Propia). ....  | 131 |
| Ilustración 112: Elementos y propiedades del ciclo de potencia (Fuente:<br>Elaboración propia).....  | 132 |
| Ilustración 113: Pérdidas de nuestro receptor (Fuente: TFG Alfonso Gómez<br>Cristóbal).....  | 132 |
| Ilustración 114: Dimensiones del receptor (Fuente: Propia). ....   | 133 |
| Ilustración 115: Distribución del calor concentrado en el receptor (Fuente: Propia).<br>.....  | 133 |
| Ilustración 116: Calor total que necesito en el receptor (Fuente: Propia).....   | 133 |
| Ilustración 117. Distribución del campo de heliostatos (Fuente: Propia).....   | 135 |
| Ilustración 118: Inversiones en las diferentes partes de la central (Fuente: Propia).<br>.....   | 136 |
| Ilustración 119: Precio total de la Planta Termosolar (Fuente: Propia). ....   | 136 |
| Ilustración 120: Ingresos en millones de € (Fuente: Propia).....   | 137 |
| Ilustración 121: Toneladas de CO <sub>2</sub> no emitidas (Fuente: Propia).....  | 137 |





## NOMENCLATURA

En este apartado se explican algunos símbolos que se utilizan a lo largo del trabajo y que han quedado sin explicar debido a que son utilizados muy comúnmente:

|               |   |                         |
|---------------|---|-------------------------|
| $m_a$         | Flujo másico de aire                      | [kg/s]                  |
| $\rho$        | Densidad                                  | [kg/m <sup>3</sup> ]    |
| $\mu$         | Viscosidad                                | [Pa·s]                  |
| $c_p$         | Calor específico                          | [J/K]                   |
| $\gamma$      | Coefficiente de dilatación adiabática     | [-]                     |
| $k$           | Coefficiente de conductividad térmica     | [W/(m·K)]               |
| $v$           | Velocidad                                 | [m/s]                   |
| $u$           | Velocidad                                 | [m/s]                   |
| $D$           | Diámetro                                  | [m]                     |
| $H$           | Altura                                    | [m]                     |
| $z$           | Altura                                    | [m]                     |
| $g$           | Constante de gravedad                     | [m/s <sup>2</sup> ]     |
| $P$           | Presión                                   | [Pa]                    |
| $T$           | Temperatura                               | [K]                     |
| $K$           | Coefficiente empírico de pérdida de carga | [-]                     |
| $\lambda$     | Factor de fricción                        | [-]                     |
| $W$           | Trabajo                                   | [W]                     |
| $Q$           | Calor                                     | [J]                     |
| $h$           | Coefficiente de convección                | [J/(m <sup>2</sup> ·K)] |
| $r_p$         | Relación de presiones del compresor       | [-]                     |
| $r_t$         | Relación de presiones de la turbina       | [-]                     |
| $\eta$        | Rendimiento                               | [%]                     |
| $\varepsilon$ | Porosidad                                 | [%]                     |
| $d_p$         | Diámetro del poro                         | [m]                     |
| $\beta$       | Coefficiente de expansión térmica         | [K <sup>-1</sup> ]      |





## RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene por objetivo el estudio y diseño de una planta termosolar con calentamiento directo de gases en receptor central en Sevilla, optimizada para un día de verano.

El trabajo presenta los cálculos necesarios para diseñar y analizar las partes más importantes de este tipo de centrales como son el ciclo de potencia, el receptor y el campo de heliostatos. Para realizar estos cálculos se ha utilizado el software MATLAB ®.

Para poder comenzar a diseñar la central se ha partido de algunas características iniciales como por ejemplo el tipo de ciclo y receptor que se van a utilizar, así como la potencia que se deseaba obtener del ciclo, etc.

Finalmente se ha estudiado el comportamiento del diseño obtenido para la planta termosolar con calentamiento directo de gases en receptor central y se ha estimado el coste de su construcción y el ahorro de CO<sub>2</sub> con respecto a una central convencional de ciclo combinado.

*This Bachelor Final Work aims to study and design a solar thermal plant with direct heating gas central receiver placed in Seville and optimized for a summer day.*

*The work presents the calculations needed to design and analyze the most important parts of this kind of plants, such as the power cycle, the receiver and the heliostat field. To perform these calculations the MATLAB ® software is employed.*

*To begin with the design of the plant, some initial characteristics of the plant are set such as the cycle type and the type of the receiver to be used, as well as the output power.*





*Finally the behaviour of the design of the plant with solar central receiver is evaluated, and the construction cost of the plant and the CO<sub>2</sub> savings with respect to a conventional combined cycle plant are estimated.*





# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En estos últimos años en los que la demanda energética ha crecido de forma vertiginosa y la dependencia de los combustibles fósiles es muy elevada, todavía hay bastantes dudas sobre el futuro energético mundial a medio y largo plazo.

Como consecuencia de esta situación, el desafío frente al que se enfrenta la sociedad es mantener este crecimiento que está experimentando la sociedad y con ello su consumo energético, pero haciéndolo de una forma más sostenible. Esto pasa por el uso y generación de energías limpias y que no procedan de fuentes agotables, como por ejemplo el petróleo.

Este trabajo tiene por meta el estudio del diseño y el posterior análisis de los resultados obtenidos, de una planta termosolar con calentamiento directo de gases en receptor central.

El presente estudio está motivado por el hecho de que nuestro país se encuentra en un emplazamiento clave para la explotación de energías limpias.

Además de la sostenibilidad, se debe tener en cuenta que uno de los objetivos que persigue la producción de energías limpias y renovables es también la autosuficiencia desde el punto de vista energético. Sin embargo, para alcanzar este objetivo, todavía deberá pasar mucho tiempo y se necesitará invertir más en investigación, ya que el precio actual de esta tecnología aún es demasiado alto debido a su falta de desarrollo.

Actualmente nos encontramos en una situación en la que España tiene una dependencia energética de un 71% aproximadamente. Esto quiere decir casi las tres cuartas partes de los recursos energéticos que necesitamos para autoabastecernos los buscamos en el extranjero.



Durante la elaboración de este trabajo se propone una metodología para el diseño de plantas termosolares con calentamiento directo de aire, abordando el cálculo y dimensionamiento de los principales elementos presentes en una central solar de este tipo.

Cabe mencionar que este trabajo aporta una primera aproximación al diseño de las centrales termosolares de calentamiento directo de gases cuya tecnología es relativamente reciente y se encuentra todavía en desarrollo. Por ello, los cálculos implicados tratarán los diversos subsistemas de la central bajo un conjunto de hipótesis y aproximaciones simplificadoras usuales en este tipo de diseños preliminares.



## **1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO**

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo mostrar los cálculos más importantes y necesarios para el diseño preliminar de una central termosolar que opera con un gas (aire) calentado directamente en un receptor central. En el diseño y análisis de esta central se han aplicado los conocimientos aprendidos durante estos años académicos y los adquiridos mediante la bibliografía especializada que se ha consultado.

Por lo tanto, los objetivos principales de este trabajo son los siguientes:

- Adquirir los conocimientos básicos sobre el funcionamiento de una planta termosolar y de cada uno de los elementos que en ella trabajan, ya sean heliostatos, receptor, torre, ciclo de potencia, etc. Este objetivo implica la consulta de bibliografía especializada sobre el tema así como la investigación a través de los distintos canales y posibilidades que brinda la red Internet para la obtención de información actualizada.
- Realizar un breve estudio sobre las posibilidades de la explotación de la energía solar y, más en concreto, estudiar la situación de la energía termosolar en nuestro país.
- Llevar a cabo el diseño de una planta termosolar y de cada una de sus partes, ya sean heliostatos, receptor, ciclo de potencia, etc. Los cálculos del diseño se realizarán en el entorno de programación MATLAB ® lo que permitirá estudiar paramétricamente los efectos de varios parámetros y las posibles mejoras del diseño.
- Obtener el ahorro de CO<sub>2</sub> de la planta termosolar con respecto un central existente de potencia análoga para ofrecer una visión de la ventaja medioambiental de la central que se ha diseñado.



- Realizar un análisis crítico de los resultados del diseño obtenido en este trabajo y también del potencial de utilización de las centrales termosolares basadas en la tecnología aquí estudiadas.



### 1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para poder llevar a cabo este proyecto, se ha trabajado siguiendo la siguiente metodología:

1. **Documentación.** El primer paso, antes de empezar la realización del proyecto, ha sido consultar la bibliografía disponible sobre el tema y leer una serie de artículos de revistas científicas internacionales y recursos informáticos que tratan sobre el diseño y funcionamiento de centrales termosolares con receptor central. Todos ellos están bien referenciados en la bibliografía. Para el acceso a dicha información se han utilizado los servicios de bases de datos (Science Direct) así como libros y revistas electrónicas que se encuentran disponibles online a través de la Biblioteca de la Universidad Carlos III de Madrid.
2. **Cálculos.** A la hora de realizar los cálculos, se ha utilizado el software de programación MATLAB ®, en su versión disponible en las aulas informáticas del Campus de Leganés de la Universidad Carlos III de Madrid. Este software ha permitido realizar multitud de cálculos de forma sencilla y eficaz a la vez que daba la posibilidad de editar o realizar pequeños cambios en el diseño para estudiar posibles variantes.
3. **Evaluación de resultados.** Una vez obtenidos los resultados de los cálculos realizados, se ha procedido a la comparación de estos con resultados reales, de características similares o parecidas. Esto ha permitido validar la coherencia y veracidad de los cálculos propuestos en el trabajo.
4. **Alternativas.** Comprobada la coherencia de los resultados, se han analizado posibles comportamientos alternativos al diseño inicial



para poderlos comparar con el funcionamiento originalmente escogido.

5. **Redacción de la memoria.** Analizados los datos y sus posibles alternativas, se ha redactado la memoria del trabajo.

La realización de esta memoria, así como los cálculos realizados, se han llevado a cabo por el autor del presente Trabajo Fin de Grado, con la asistencia del tutor del mismo. Tanto la memoria como los cálculos en ella contenidos tienen un enfoque académico en consonancia con los objetivos que este persiguen en este tipo de trabajos.





## 2. ENERGÍA SOLAR

### 2.1 INTRODUCCIÓN A LAS ENERGÍAS RENOVABLES

En la sociedad en que vivimos no se plantea un futuro sin energía eléctrica. Es la energía la que mueve todo y se haría muy difícil vivir sin ella. Pero se es consciente de que los recursos que utilizados para obtener este tipo de energía son limitados y se van a agotar.

En la actualidad existen varias alternativas a la producción de energía eléctrica mediante combustibles fósiles: son las denominadas energías renovables. Este tipo de energías se obtienen de fuentes naturales y, a priori, inagotables.

Las energías renovables se pueden clasificar en dos grandes grupos: contaminantes y no contaminantes. Las del primer grupo se suelen obtener a partir de la combustión de materia orgánica, madera, residuos orgánicos, etc. y tendrían el mismo problema que los combustibles fósiles, de no ser porque el periodo de formación de este tipo de combustibles es mucho menor. El tiempo que tarda en formarse el petróleo que consumimos en un día son unos 110.000 años. En cambio, si se utiliza madera en vez de petróleo, este periodo es mucho más corto, ya que el ser humano es capaz, a lo largo de su vida, de plantar un árbol, verlo crecer y, después, usarlo para producir energía.

Las del segundo grupo, las energías no contaminantes, no tienen el problema de la contaminación, como su propio nombre indica. Entre ellas, las más importantes son:

- Energía solar
- Energía eólica
- Energía geotérmica
- Energía hidráulica o hidroeléctrica
- Energía mareomotriz
- Energía undimotriz

En la gráfica de la ilustración 1 se pueden observar los datos ofrecidos por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio sobre el consumo energético total (incluyendo generación eléctrica, transporte, industria, calefacción, etc.) en nuestro país en el año 2010:

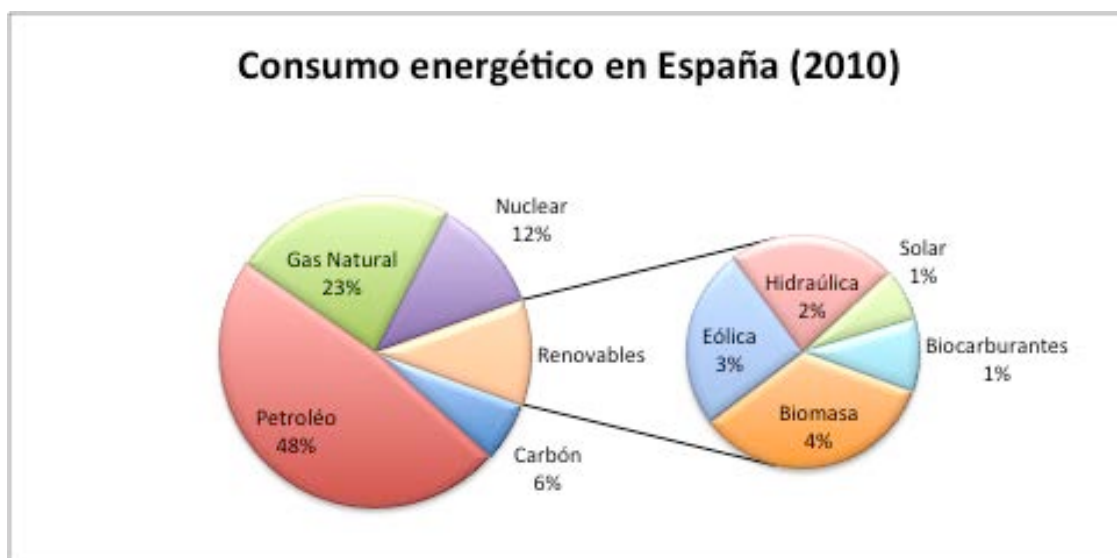
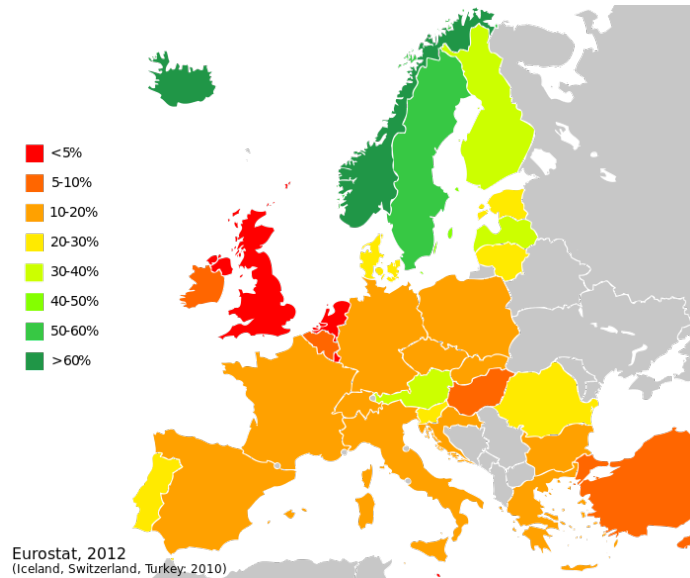


Ilustración 1: Gráfico del consumo energético español en 2010 (Fuente: Propia).

Como se puede comprobar solo se consumen un 11% de energía proveniente de fuentes renovables. Esto tiene que ir aumentando y llegará un momento en el que todos los países sean independientes, energéticamente hablando, gracias a sus fuentes renovables de energía. Pero para llegar a ello, todavía hay que esperar un tiempo.

En la actualidad el mapa de producción de energías renovables en Europa y países cercanos es el siguiente:



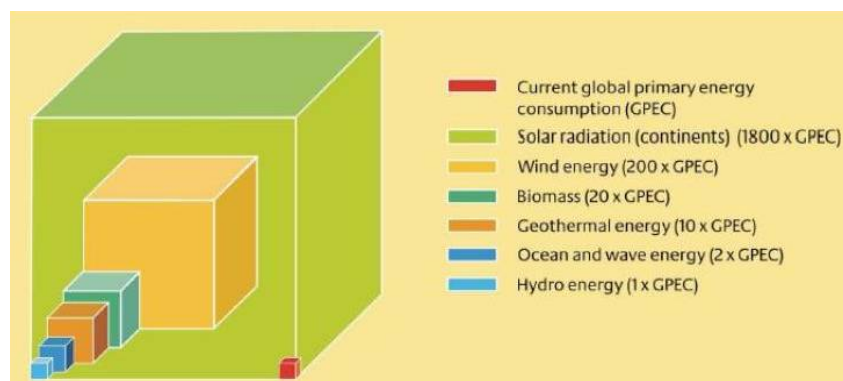
**Ilustración 2: Proporción de energías renovables en la producción de energía eléctrica de los países de la UE en el año 2012 (Fuente: Wikipedia).**

Además de proporcionar independencia energética a los países, las energías renovables buscan resolver otra serie de problemas como son:

- El consumo de combustibles fósiles para la producción de energía. Además de ser un recurso limitado y cada vez más escaso, acarrea un grave problema ecológico y medioambiental, como es la emisión de gases que aumentan el efecto invernadero.
- El coste de la energía. En la actualidad, es más alto debido al alto coste de la investigación con este tipo de energías, pero cuando esta tecnología se estabilice y se explote, su coste será menor.

Cada país debe valorar qué tipo de recursos prefiere explotar para la obtención de energía, ya que la producción de muchos de ellos varía con las estaciones o la localización geográfica, por lo que su productividad no es igual en todos los sitios. Por ejemplo, teniendo en cuenta la cantidad de horas de sol anuales, varía muchísimo si se está en Ecuador o en Finlandia; lo mismo que tampoco hay igualdad de condiciones a la hora de obtener energía mareomotriz en España que Alemania, ya que la superficie costera y la actividad del mar es distinta en ambos países.

Los recursos de los que se puede obtener energía limpia con más disponibilidad son: el Sol, ya que, como podemos ver en la siguiente imagen, representa unas 1800 veces el consumo de energía mundial actual; el viento, que es unas 200 veces el consumo global de energía; posteriormente, están la biomasa, la energía geotérmica, la mareomotriz y, por último, la energía hidráulica:



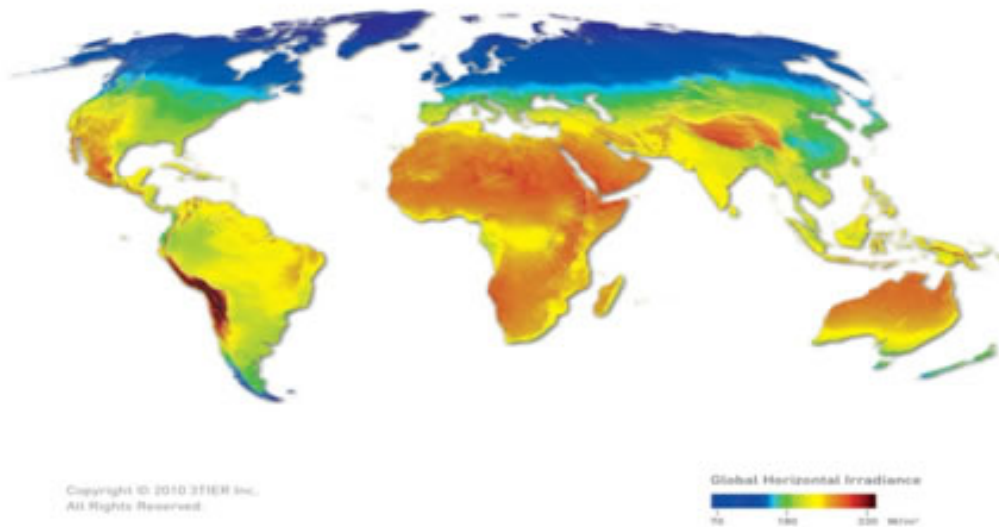
**Ilustración 3: Disponibilidad de energías renovables frente al consumo de energía actual (Fuente: <http://jmirez.wordpress.com>)**

España, por su localización geográfica, se encuentra en un enclave idóneo para explotar este recurso proveniente del Sol. Una de las formas más extendidas de explotación de la energía solar es la tecnología fotovoltaica, aunque el gran inconveniente que tiene es que todavía no se ha encontrado ninguna forma barata y eficiente de almacenarla o hibridarla. Otro inconveniente es la toxicidad de alguno de los elementos químicos necesarios para la fabricación de los paneles fotovoltaicos.

Otra alternativa de explotación del recurso solar es la energía solar termoelectrica que posee la gran ventaja de su fácil hibridación con diferentes tecnologías. En la actualidad, dicha hibridación se realiza con gas natural, pero en un futuro se podrá hacer con una fuente renovable, obteniendo una energía totalmente limpia.

Como ya se ha dicho anteriormente, España goza de una localización privilegiada para este tipo de explotaciones de la energía solar. Según el siguiente mapa, todos los países, con una latitud entre los 40º norte o 40º sur, podrían

colocar centrales termosolares, ya que en esta zona la radiación incidente es mucho mayor que en el resto de lugares.



**Ilustración 4: Mapa de la radiación solar recibida (Fuente: Wikipedia).**

Debido a esta desigualdad en la cantidad de radiación que llega a unos lugares con respecto a otros, son varios los proyectos que prevén construir centrales termosolares en estas zonas más favorables, para suministrar energía a países más alejados.

Uno de estos proyectos, que promueve la generación de energías renovables en lugares cuyas propiedades geográficas sean más propicias es Desertec. Su objetivo es interconectar toda Europa, la parte norte de África y la parte oeste de Asia para hacerlas auto-sostenibles energéticamente. Principalmente, este proyecto usa energía solar y eólica, pero también se ayuda de la hidráulica, biomasa y geotérmica para llevar a cabo su objetivo. En la ilustración 5 se observa un mapa con las centrales que planea construir.



Ilustración 5: Posible infraestructura de provisión de energía a Europa, el Medio Oriente y África del Norte (Fuente: Desertec Foundation).

Esta imagen también muestra el área que deberíamos utilizar para abastecer a todo el mundo con energía solar, utilizando paneles de concentración solar que en términos de radiación, suponen 107,000 TWh al año.

Este mismo ejercicio lo llevó a cabo el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), que estudió la radiación térmica que llega a nuestro país. Quitando todo el terreno destinado a algún otro propósito, ya sean carreteras, ferrocarriles, espacios protegidos, litoral, poblaciones, etc., obtuvo los siguientes resultados:



| Potencial disponible | Producción eléctrica anual bruta (sobre el territorio) |   |
|----------------------|--|---|
|                      | (TWh/año)  | Veces consumo eléctrico nacional (2008 = 263 TWh) |
| CP                   | 19.867   | 76  |
| CP (SAT=6)           | 20.750   | 79  |
| CLF                  | 23.926   | 91  |
| CRC                  | 17.778   | 68  |
| CRC (SAT=6)          | 16.627   | 63  |
| DPS                  | 12.670   | 48  |

Ilustración 6: Resultados del potencial disponible en nuestro país (Fuente: IDAE).

En la tabla de resultados usa las siguientes abreviaturas:

- CP = Centrales con receptores parabólicos.
- CLF = Centrales con receptores lineales tipo Fresnel.
- CRC = Centrales con receptor central.
- DPS = Centrales con disco parabólico Stirling.

Como se puede apreciar en la tabla de resultados, España se podría autoabastecer sobradamente de la energía que necesita con la cantidad de radiación solar que llega al territorio nacional y con la tecnología actual.





## 2.2 CENTRALES TERMOSOLARES

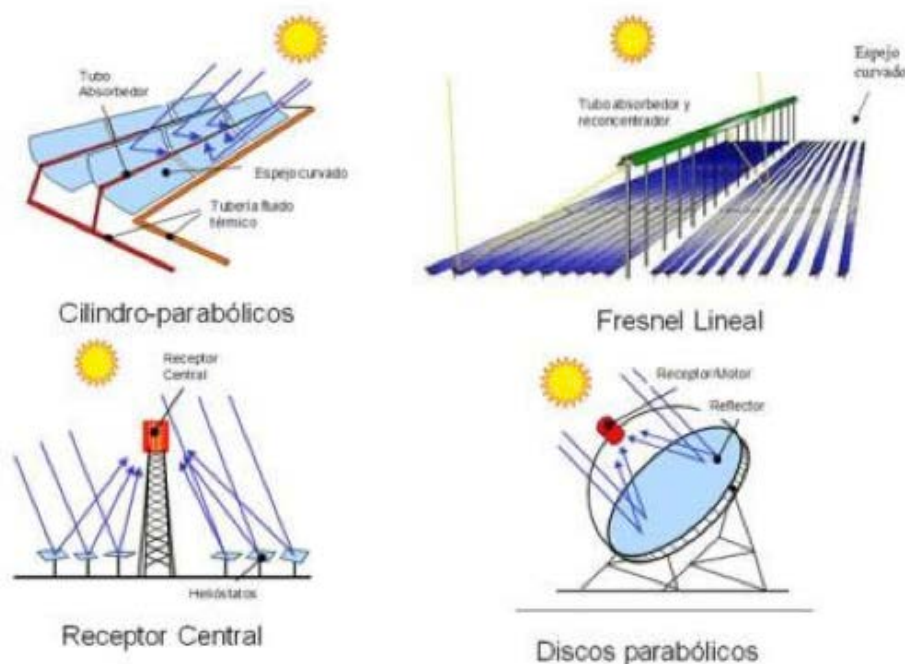
Una central termosolar es una instalación que, a partir de la concentración de radiación solar, calienta un fluido térmico para después obtener energía eléctrica. Para concentrar la radiación solar se usan diferentes tecnologías, pero la mayoría de ellas utilizan espejos, debido a que la relación entre la energía recibida y la aprovechada es la mayor.

Según donde se concentre la radiación solar, esta tecnología se puede clasificar de la siguiente manera:

**Concentración puntual:** consiste en concentrar toda la radiación solar en un mismo punto, por lo que la radiación obtenida en este punto es mucho mayor que lo que le llegaría normalmente. Hay ocasiones en las que la ratio de concentración de radiación puede llegar a 1000. Es decir, que a ese punto llega la misma radiación que se concentraría en una superficie mil veces mayor. Existen dos tecnologías diferentes para concentrar la radiación de esta forma: los receptores centrales, y el disco Stirling.

**Concentración lineal:** consiste en concentrar toda la radiación que le llega al espejo en un receptor lineal que se encuentra por encima de este. Estos sistemas tienen una ratio de concentración bastante menor que los de concentración puntual. Existen también dos tecnologías para hacerlo: receptores parabólicos y receptores lineales tipo Fresnel.





**Ilustración 7: Tipos de tecnologías de concentración solar (Fuente: TFG Ascensión Aynat Piquer).**

En estos tipos de centrales se puede tener o no sistema de almacenamiento térmico. Si no se tiene, se calienta un fluido térmico, agua o aire, dependiendo del ciclo de potencia que se vaya a usar, para después pasar este fluido a través de una turbina y de ahí generar energía eléctrica, como en el resto de centrales.

Si se cuenta con sistema de almacenamiento térmico, en vez de aire o agua se calienta un fluido térmico que almacene mejor el calor; normalmente son mezcla de sales fundidas y, después, cuando se necesita, mediante un intercambiador de calor se calienta el aire o el agua y dicho fluido se hace pasar por una turbina para obtener energía eléctrica.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de los métodos de concentración de radiación solar que existen:

- Colectores cilíndrico parabólicos.
- Receptores lineales tipo Fresnel.
- Disco parabólico con motor Stirling.
- Receptor central.

### 2.2.1 Centrales con receptores cilíndrico parabólicos

El colector cilíndrico parabólico (CCP) se compone de un espejo cilíndrico parabólico que refleja la radiación sobre un tubo el cual actúa como receptor colocado en la línea focal de la parábola.

La radiación reflejada a través del espejo parabólico calienta el fluido térmico que circula por el tubo llevándolo a una temperatura no mayor que unos 450° C. En la ilustración 8 se puede observar el funcionamiento de un receptor de este tipo:

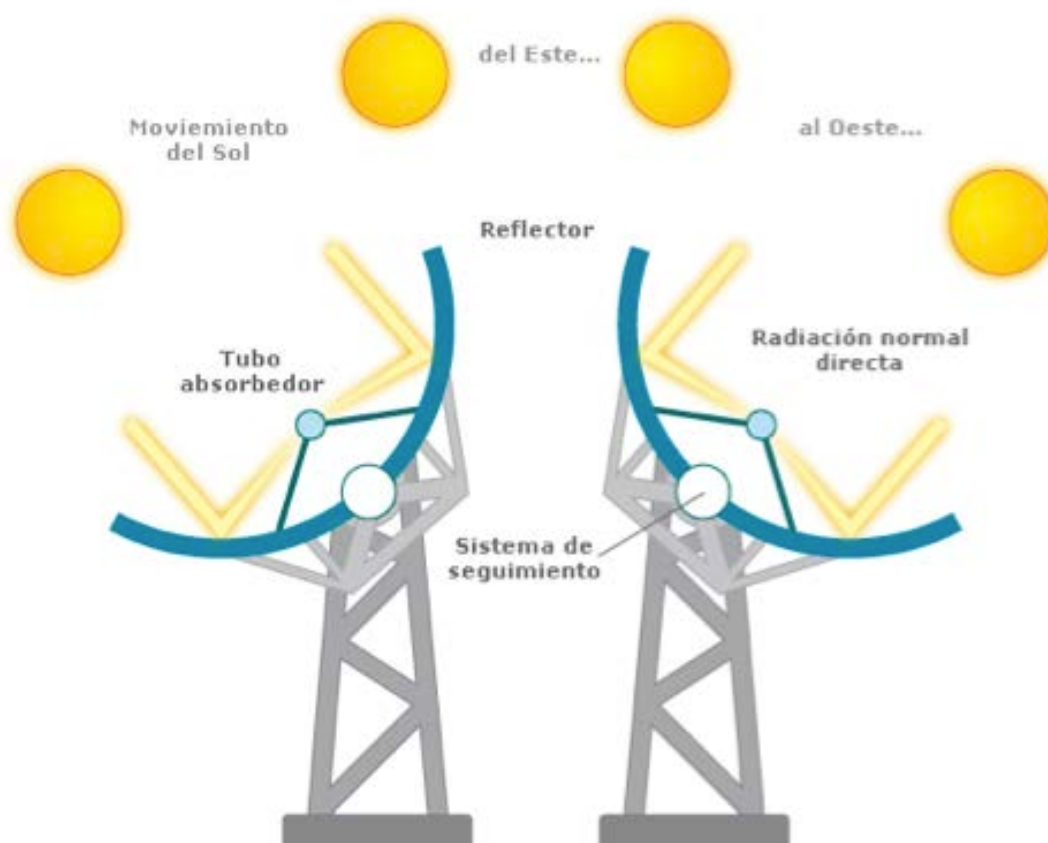


Ilustración 8: Esquematización de un sistema de colector cilíndrico parabólico (Fuente: [www.afinidadelectrica.com](http://www.afinidadelectrica.com))

Las partes de las que se componen estos sistemas son las siguientes:

- El reflector cilíndrico parabólico.
- El tubo absorbedor.
- El sistema de seguimiento.
- La estructura metálica.



### **a) El reflector cilíndrico parabólico**

La misión del reflector es concentrar toda la radiación que le llega sobre el tubo absorbedor que se encuentra en el foco de su parábola. El reflector es, en definitiva, un espejo curvado que debido a su gran reflectividad es capaz de concentrar toda la radiación que le llega en su foco.

### **b) El tubo absorbedor**

De este elemento depende en gran medida el rendimiento de la central proyectada. Este tubo puede ser un único tubo o, más comúnmente, dos tubos concéntricos. Por el interior circula el fluido térmico y se le coloca un tubo de cristal por fuera para aislarlo, disminuyendo las pérdidas, y para protegerlo.

Dependiendo de las temperaturas que deseen alcanzarse, se utiliza un fluido térmico u otro. Si las temperaturas de trabajo son bajas, menores de 200°C, se puede utilizar agua, aunque normalmente se mezcla con Etilen-Glicol, para mejorar sus propiedades y que el fluido no llegue a congelarse. En cambio, si se quiere utilizar unas temperaturas de trabajo mayores, el fluido térmico que se utiliza es un aceite sintético que nos permite trabajar con temperaturas entre los 300 y 400°C.

### **c) El sistema de seguimiento**

Como el resto de sistemas de concentración de radiación solar, el receptor cilíndrico parabólico solo puede concentrar la radiación directa del sol, por lo que cuanto más tiempo esté enfocado en la dirección en la que procede esta radiación, mayor será la cantidad que consiga concentrar. Esta es la función del sistema de seguimiento: girar los reflectores siguiendo la trayectoria del sol en el cielo.



#### d) La estructura metálica

La estructura sirve para sujetar y mantener el conjunto de elementos, darle rigidez y ofrecer cimentación al conjunto. Todas las estructuras de los CCP son metálicas.

A continuación, se muestra una tabla con las centrales de este tipo que existen en España, su localización, capacidad y si disponen de almacenamiento térmico o no.

| Nombre           | Capacidad<br>(MW) | Localización                         | Almacenamiento<br>(Horas) |
|------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Andasol-1        | 50                | Aldeire<br>(Granada)                 | 7,5                       |
| Andasol-2        | 50                | Aldeire y La Calahorra<br>(Granada)  | 7,5                       |
| Ibersol          | 50                | Puertollano<br>(Ciudad Real)         | 0                         |
| La Risca         | 50                | Alvarado<br>(Badajoz)                | 0                         |
| Extresol-1       | 50                | Torre de Miguel Sesmero<br>(Badajoz) | 7,5                       |
| Extresol-2       | 50                | Torre de Miguel Sesmero<br>(Badajoz) | 7,5                       |
| Solnova 1        | 50                | Sanlúcar la Mayor<br>(Sevilla)       | 0                         |
| Solnova 3        | 50                | Sanlúcar la Mayor<br>(Sevilla)       | 0                         |
| La Florida       | 50                | Badajoz                              | 7,5                       |
| Solnova 4        | 50                | Sanlúcar la Mayor<br>(Sevilla)       | 0                         |
| Majadas          | 50                | Majadas de Tiétar<br>(Cáceres)       | 0                         |
| La Dehesa        | 50                | La Garrovilla<br>(Badajoz)           | 7,5                       |
| Palma del Río II | 50                | Palma del Río<br>(Córdoba)           | 0                         |
| Manchasol-1      | 50                | Alcázar de San Juan<br>(Ciudad Real) | 7,5                       |
| Manchasol-2      | 50                | Alcázar de San Juan<br>(Ciudad Real) | 7,5                       |
| Palma del Río I  | 50                | Palma del Río<br>(Córdoba)           | 0                         |



|                      |    |   |     |
|----------------------|----|---|-----|
| <b>Lebrija-1</b>     | 50 | Lebrija<br>(Sevilla)  | 0   |
| <b>Andasol-3</b>     | 50 | Aldeire y La Calahorra<br>(Granada)   | 7,5 |
| <b>Helioenergy 1</b> | 50 | Écija<br>(Sevilla)  | 0   |
| <b>Astexol II</b>    | 50 | Badajoz   | 7,5 |
| <b>Valle 1</b>       | 50 | San José del Valle<br>(Cádiz)   | 7,5 |
| <b>Valle 2</b>       | 50 | San José del Valle<br>(Cádiz)   | 7,5 |
| <b>Aste 1A</b>       | 50 | Alcázar de San Juan<br>(Ciudad Real)  | 8   |
| <b>Aste 1B</b>       | 50 | Alcázar de San Juan<br>(Ciudad Real)  | 8   |
| <b>Helioenergy 2</b> | 50 | Écija<br>(Sevilla)  | 0   |
| <b>Solarcor 1</b>    | 50 | El Carpio<br>(Córdoba)  | 0   |
| <b>Solarcor 2</b>    | 50 | El Carpio<br>(Córdoba)  | 0   |
| <b>Morón</b>         | 50 | Morón de la Frontera<br>(Sevilla)   | 0   |
| <b>Helios 1</b>      | 50 | Puerto Lápice (Ciudad Real)<br>Arenas de San Juan (Ciudad Real)<br>Villarta de San Juan (Ciudad Real) | 0   |
| <b>Solaben 3</b>     | 50 | Logrosán<br>(Cáceres)   | 0   |
| <b>Guzman</b>        | 50 | Palma del Rio<br>(Córdoba)  | 0   |
| <b>Olivenza 1</b>    | 50 | Olivenza<br>(Badajoz)   | 0   |
| <b>La Africana</b>   | 50 | Posadas<br>(Córdoba)  | 7,5 |
| <b>Helios 2</b>      | 50 | Puerto Lápice (Ciudad Real)<br>Arenas de San Juan (Ciudad Real)<br>Villarta de San Juan (Ciudad Real) | 0   |
| <b>Orellana</b>      | 50 | Orellana<br>(Badajoz)   | 0   |
| <b>Extresol-3</b>    | 50 | Torre de Miguel Sesmero<br>(Badajoz)  | 7,5 |
| <b>Solaben 2</b>     | 50 | Logrosán<br>(Cáceres)   | 0   |
| <b>Termosol 1</b>    | 50 | Navalvillar de Pela<br>(Badajoz)  | 9   |
| <b>Termosol 2</b>    | 50 | Navalvillar de Pela<br>(Badajoz)  | 9   |
| <b>Solaben 1</b>     | 50 | Logrosán  | 0   |



|                              |      |                                   |     |
|------------------------------|------|-----------------------------------|-----|
|                              |      | (Cáceres)                         |     |
| <b>Enerstar</b>              | 50   | Villena<br>(Alicante)             | 0   |
| <b>Solaben 6</b>             | 50   | Logrosán<br>(Cáceres)             | 0   |
| <b>Casablanca</b>            | 50   | Cáceres                           | 7,5 |
| <b>Arenales</b>              | 50   | Morón de la Frontera<br>(Sevilla) | 7   |
| <b>Termosolar<br/>Borges</b> | 22,5 | Borjas Blancas<br>(Lérida)        | 0   |

Ilustración 9: Tabla de centrales de receptor cilíndrico parabólico en España (Fuente: Wikipedia).

### 2.2.2 Centrales con colectores lineales tipo Fresnel

Este tipo de colectores, comparados con los demás, en términos de eficiencia, los colectores de tipo Fresnel son los que menor rendimiento presentan, aunque cabe destacar en su favor que son los que conllevan un menor coste.

Su tecnología es muy parecida a la de los receptores cilíndricos parabólicos. Poseen también el tubo absorbedor por el que circula el fluido térmico, que es calentado mediante la concentración de radiación que realizan una serie de espejos dirigidos por un sistema de seguimiento que optimiza su posición, en cada momento, con respecto a la posición del Sol. La única diferencia que encontrada con respecto al modelo anterior es la forma que tienen los espejos; en este caso son espejos planos, como se puede apreciar en la figura 10:



Ilustración 10: Representación de Colectores Fresnel (Fuente: CNIM).

Las partes de las que se compone este sistema son las siguientes:

- Cimentación y estructura de soporte.
- Sistema de seguimiento solar.
- Reflector primario.
- Tubo absorbedor.
- Reflector secundario.

#### **a) Cimentación y estructura de soporte.**

La estructura de soporte del colector lineal tipo Fresnel es simple y muy ligera ya que está construida de perfiles fabricados con acero galvanizado. Esta estructura suele sujetar al receptor primario a 1 metro de altura sobre el suelo y al receptor secundario sobre unos 7 o 10 metros.

#### **b) Sistema de seguimiento solar.**

Cada línea de espejos posee una inclinación del suelo con respecto a la normal, lo que llevaría a la deducción de que se necesita un sistema de seguimiento para cada fila de espejos. Pero, al estar situadas en paralelo todas las líneas de espejos



sufren el mismo desplazamiento a lo largo del día por lo que, para realizar el seguimiento del sol, solo hace falta un motor para mover varias líneas de espejos.

### **c) Reflector primario.**

El reflector primario está compuesto por todos los espejos alargados que se encargan de concentrar la radiación sobre el tubo que tienen encima. Estos espejos son lo que diferencia esta tecnología del receptor cilíndrico parabólico y también lo que hace que sea más barata, ya que los espejos no hay que curvarlos. Aun así, recientemente se ha publicado un estudio que determina que la eficiencia de los espejos aumenta si tienen una pequeña curvatura, la equivalente a la que tiene una circunferencia de 30 metros de radio.

### **d) Tubo absorbedor.**

Otra de las pequeñas diferencias que tiene esta tecnología con respecto a la comentada anteriormente es que el tubo absorbedor tiene un reflector secundario en la parte superior, lo que propicia un aprovechamiento mayor de la radiación reflejada.

Por el tubo suele circular agua, aunque también se utilizan otros fluidos térmicos. En el caso del agua, esta se calienta hasta unos  $270^{\circ}\text{C}$ , que es una temperatura algo mayor que con la que se trabaja cuando se utiliza agua en un receptor cilíndrico parabólico.

### **e) Reflector secundario.**

La diferencia se ha comentado en el apartado previo: el pequeño reflector que posee el tubo absorbedor en la parte posterior le permite aprovechar mejor la radiación reflejada sobre el tubo.





Este reflector no es más que un espejo que envuelve por encima al tubo para aprovechar los rayos más oblicuos y mejorar así el rendimiento general de la instalación.

A continuación, se presenta una tabla con las centrales de este tipo que existen en España, su localización, capacidad y si disponen de almacenamiento térmico o no.

| Nombre                  | Capacidad<br>(MW) | Localización        | Almacenamiento<br>(Horas) |
|-------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|
| <b>Puerto Errado I</b>  | 1,4               | Calasparra (Murcia) | 0,5                       |
| <b>Puerto Errado II</b> | 30                | Calasparra (Murcia) | 0,5                       |

**Ilustración 11:** Tabla de centrales con colectores lineales tipo Fresnel en España (Fuente: Wikipedia).

### 2.2.3 Centrales con disco parabólico Stirling

El sistema de disco parabólico con motor Stirling consiste, básicamente, en un reflector con forma paraboloide que concentra la radiación en un receptor colocado en un foco del paraboloide, en el cual hay acoplado un sistema de generación eléctrica compacto, normalmente un motor. Por lo tanto, la radiación está concentrada sobre el receptor por el disco parabólico y el motor la transforma en energía eléctrica.

Este tipo de sistemas se caracterizan por su alta autonomía y un buen rendimiento, aunque su poca fiabilidad y su elevado coste les impiden situarse en el mercado solar de forma estable. En la ilustración 12 se puede observar un sistema de discos parabólicos con motores Stirling:



Ilustración 12: Disco parabólico con motor Stirling. (Fuente: Wikipedia).

Los componentes de un sistema de este tipo son los siguientes:

- Concentrador.
- Receptor.
- Sistema de generación.
- Estructura, soporte y mecanismos.

#### a) **Concentrador.**

La forma que tiene el espejo en este tipo de sistemas es la de un paraboloide, pero el tamaño de este varía según la potencia que se quiera obtener de él y de su antigüedad. En los discos más antiguos, el diámetro de apertura puede medir unos 7 metros; sin embargo, en los más nuevos puede llegar a medir hasta 17 metros. La relación de concentración puede llegar a un valor de 3000.



## **b) Receptor**

El **receptor** empleado en este tipo de tecnología es de cavidad, por lo que la radiación entra por un hueco que hay en el mismo e incide directamente sobre la parte posterior, sobre el absorbedor; de esta manera, las pérdidas que se producen son menores.

## **c) Sistema de generación**

El sistema de generación consiste en un ciclo de potencia o en una máquina térmica y el generador propiamente dicho, que es del que se obtiene la energía eléctrica.

El desarrollo de esta tecnología siempre ha ido a la par con la evolución de los motores Stirling aunque, en la actualidad, también se utilizan turbinas de gas de tamaño considerablemente pequeño y se obtiene una potencia, ya sea de la turbina o del motor de entre 5 y 25 kW, con un rendimiento que oscila en torno al 35%.

## **d) Estructura, soporte y mecanismos**

El sistema de disco parabólico con motor Stirling también utiliza una estructura móvil con un seguimiento solar que le permite estar posicionado en la mejor dirección para poder sacar el máximo rendimiento a esta tecnología en todo momento.

En España no existe ninguna central de este tipo en funcionamiento.

#### 1.2.4 Centrales con receptor central

El funcionamiento de esta tecnología se basa en la concentración de la radiación mediante unos espejos denominados heliostatos sobre un receptor que se sitúa en lo alto de una torre como se aprecia en la ilustración número 13. Su tamaño varía en función del tamaño del campo de heliostatos.



**Ilustración 13: Planta de Gemasolar (Fuente: [www.torresolenergy.com](http://www.torresolenergy.com)).**

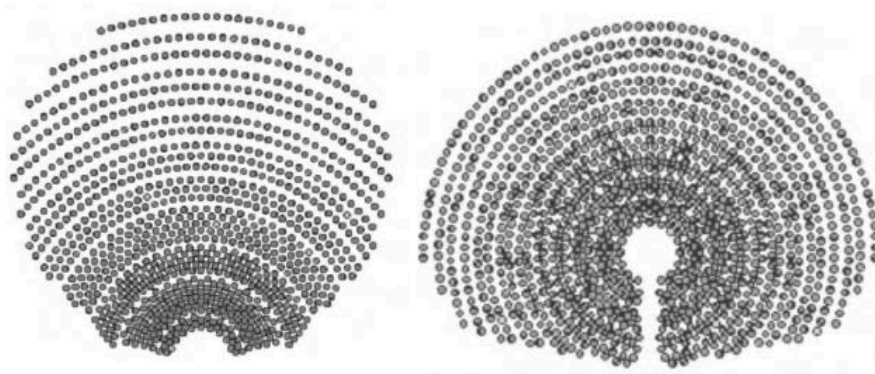
Las partes principales de este sistema son:

- El campo de heliostatos.
- El receptor.
- El ciclo de potencia.

##### **a) El campo de heliostatos**

El heliostato es el elemento principal de esta tecnología. Consta de una superficie altamente reflectante unida a un soporte motorizado que permite orientarla en la dirección óptima para reflejar la mayor cantidad de radiación.

Las distribuciones del campo de heliostatos dependen del diseño de cada planta y del tipo de receptor que se use. En la imagen 14 se muestran algunas de estas distribuciones:



**Ilustración 14:** Distribuciones del campo de heliostatos (Fuente: [www.crcnetbase.com](http://www.crcnetbase.com)).

### **b) El receptor**

Es el encargado de transmitir la radiación concentrada al fluido térmico. En caso de que no haya sistema de almacenamiento térmico se hará directamente sobre el agua o el aire; en caso de que sí que haya la radiación será transmitida al fluido térmico que actúe como intermediario (normalmente mezcla de sales fundidas), y después, mediante un intercambiador de calor, será transmitido al agua o al aire cuando sea necesario.

Existen muchos diseños del receptor, pero en este proyecto se va a utilizar un receptor volumétrico poroso en el que la radiación llegará en toda su superficie y se transmitirá por convección hacia el interior por donde circulará el fluido térmico que es directamente el gas usado en el ciclo de potencia. Esto tiene la ventaja de ahorrar un fluido intermedio en la planta, lo cual beneficia el rendimiento del ciclo de potencia y la inversión en la misma para situaciones en las que no sea necesario el almacenamiento de energía.

### **c) Ciclo de potencia**

Es el encargado de transformar la energía térmica recibida en energía eléctrica. Los dos posibles ciclos que se utilizan en este tipo de centrales son:

- Ciclo Brayton o de turbina de gas.
- Ciclo Rankine o de vapor.

## I. Ciclo Brayton

El ciclo Brayton es un ciclo térmico de potencia que, en su forma más básica, se basa en una primera compresión, un calentamiento y una posterior expansión del fluido de trabajo, de la cual se obtiene la potencia. El fluido de trabajo en este tipo de ciclos es siempre un gas debido a que el proceso se realiza a muy altas temperaturas y, por lo general, se suele utilizar aire.

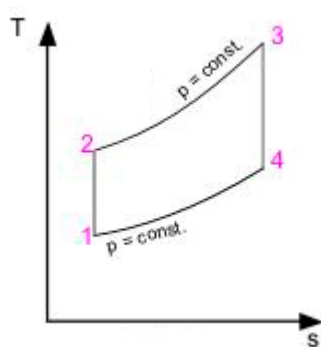


Ilustración 15: Diagrama T-s de un ciclo Brayton ideal (Fuente: eribera\_bo.tripod.com).

En la imagen 16 se puede observar el esquema de los componentes de un ciclo Brayton:

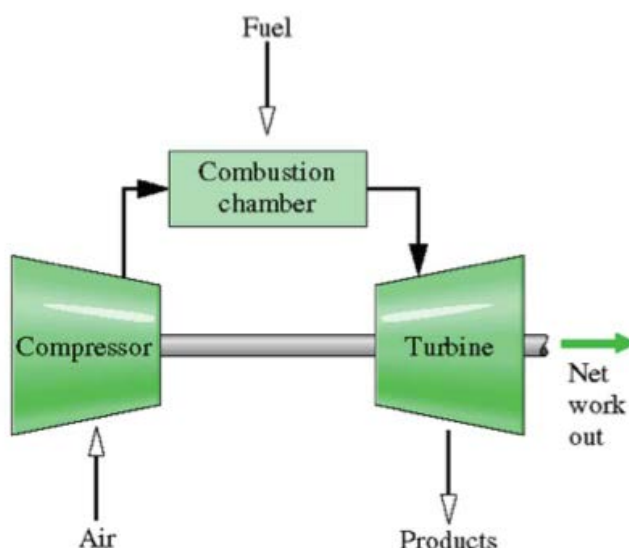


Ilustración 16: Esquema de un ciclo Brayton (Fuente: Moran y Shapiro, Fundamentos de termodinámica y técnica)

El fluido térmico, normalmente aire, entra primero en el compresor, elevando su presión y temperatura. A continuación, entra en una cámara de combustión donde, idealmente, solo aumentará su temperatura y, finalmente, pasará por la turbina, donde se expandirá y descenderá su temperatura. Este último proceso es el que determina la cantidad de potencia que se obtiene del ciclo.

La ilustración 17 se muestra un diagrama T-s del aire en el que se representan los procesos por los cuales pasa el fluido térmico en este ciclo. En negro, los procesos ideales y en azul, los reales:

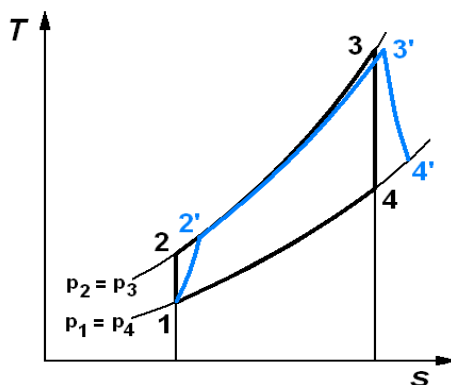
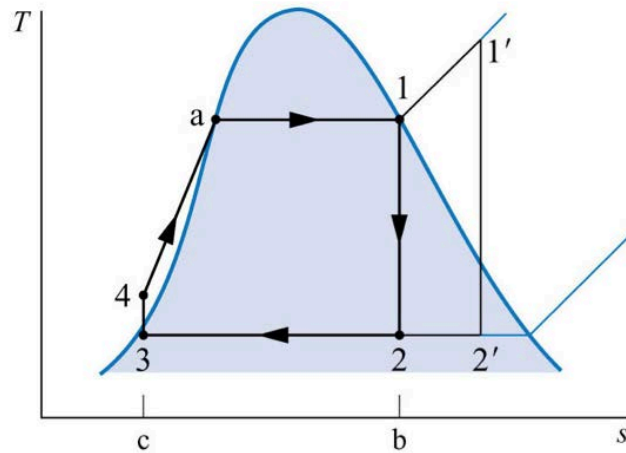


Ilustración 17: Diagrama T-s de un ciclo Brayton real (Fuente: Wikipedia).

## II. Ciclo Rankine

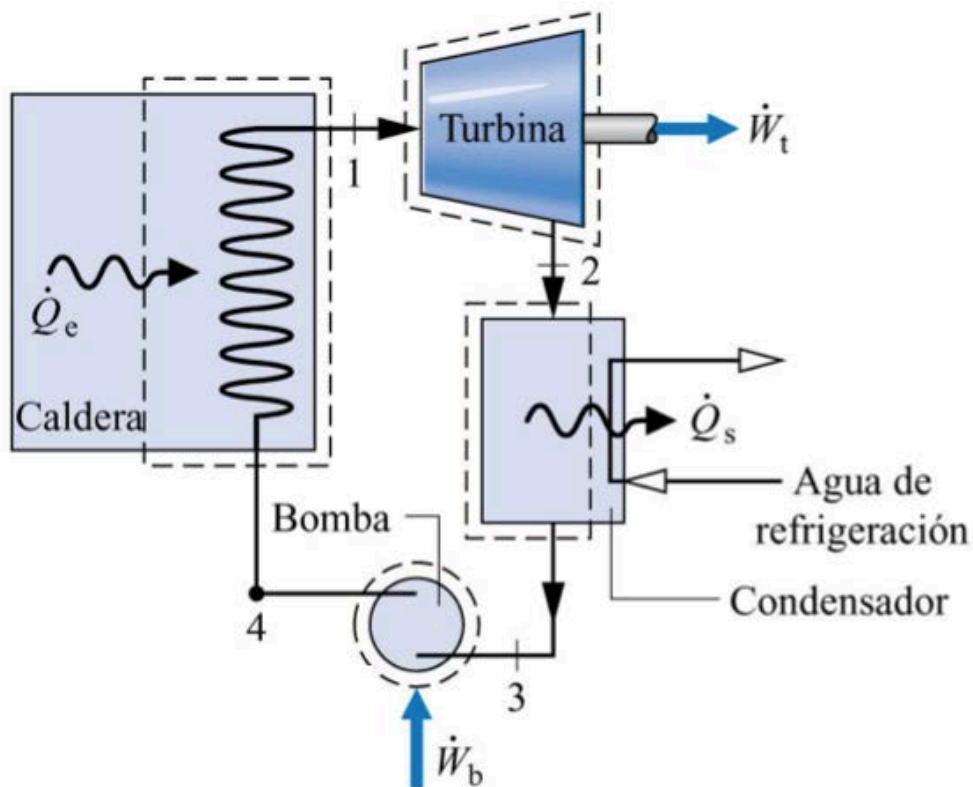
El ciclo Rankine es el otro ciclo térmico que se suele utilizar para obtener potencia de centrales termosolares. En este caso, en su forma más simple, el ciclo Rankine se basa en una primera compresión, un posterior calentamiento y una expansión final de la cual se obtiene el trabajo.





**Ilustración 18:** Diagrama T-s de un ciclo Rankine ideal (Fuente: Moran y Shapiro, Fundamentos de termodinámica y técnica).

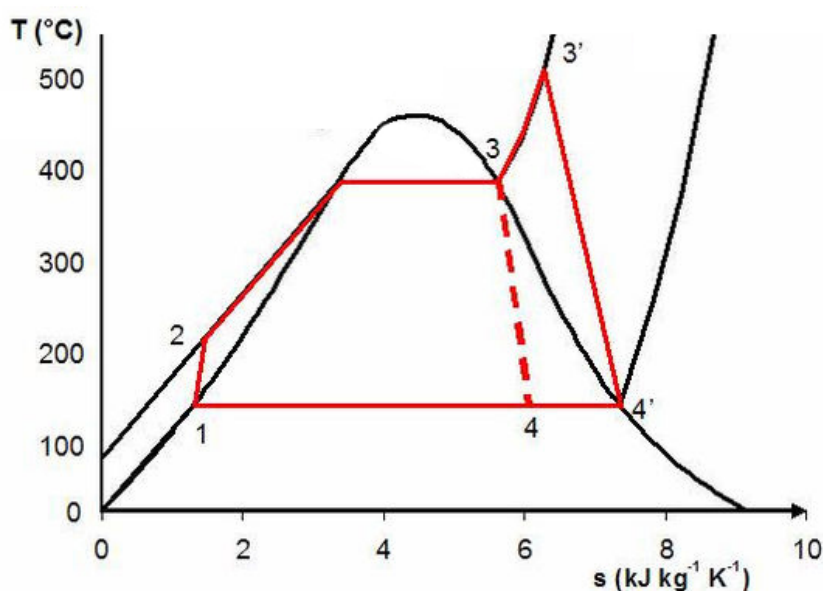
A diferencia del ciclo Brayton, este ciclo trabaja con agua como fluido térmico por lo que los componentes utilizados para someter al fluido a estos procesos, aunque sean los mismos procesos que en el ciclo anterior, varían ligeramente. A continuación, en la ilustración 19, se muestra un esquema de los componentes del ciclo:



**Ilustración 19:** Esquema de los componentes de un ciclo Rankine (Fuente: Moran y Shapiro, Fundamentos de termodinámica y técnica).



El agua se hace pasar a través de la bomba para aumentar su presión lo más idealmente posible, es decir, sin apenas variar su temperatura. A continuación, se hace pasar el agua por la caldera, aumentando su temperatura, cambiándola de estado a vapor y aumentando un poco más su temperatura para alcanzar condiciones de vapor sobrecalentado. Después se hace pasar este vapor por una turbina, donde se expande y desciende la temperatura, obteniendo de aquí la potencia del ciclo. Finalmente, este vapor se hace pasar por un condensador donde volverá a su estado inicial para volver a empezar de nuevo el ciclo. En la ilustración 20 se puede observar el diagrama T-s de un ciclo Rankine:



**Ilustración 20: Diagrama T-s de un ciclo Rankine (Fuente: Universidad Carlos III de Madrid).**

Adjuntamos una tabla con las centrales de este tipo que existen en España, su localización, capacidad y si disponen de almacenamiento térmico o no.

| Nombre           | Capacidad (MW) | Localización                   | Almacenamiento (Horas) |
|------------------|----------------|--------------------------------|------------------------|
| <b>Gemasolar</b> | 20             | Fuentes de Andalucía (Sevilla) | 15                     |
| <b>PS10</b>      | 10             | Sanlúcar la Mayor (Sevilla)    | 1                      |
| <b>PS20</b>      | 20             | Sanlúcar la Mayor (Sevilla)    | 1                      |

**Ilustración 21: Tabla de centrales con receptor central en España (Fuente: Wikipedia).**

## 2.3 CENTRALES TÉRMICAS DE RECEPTOR CENTRAL EN ESPAÑA

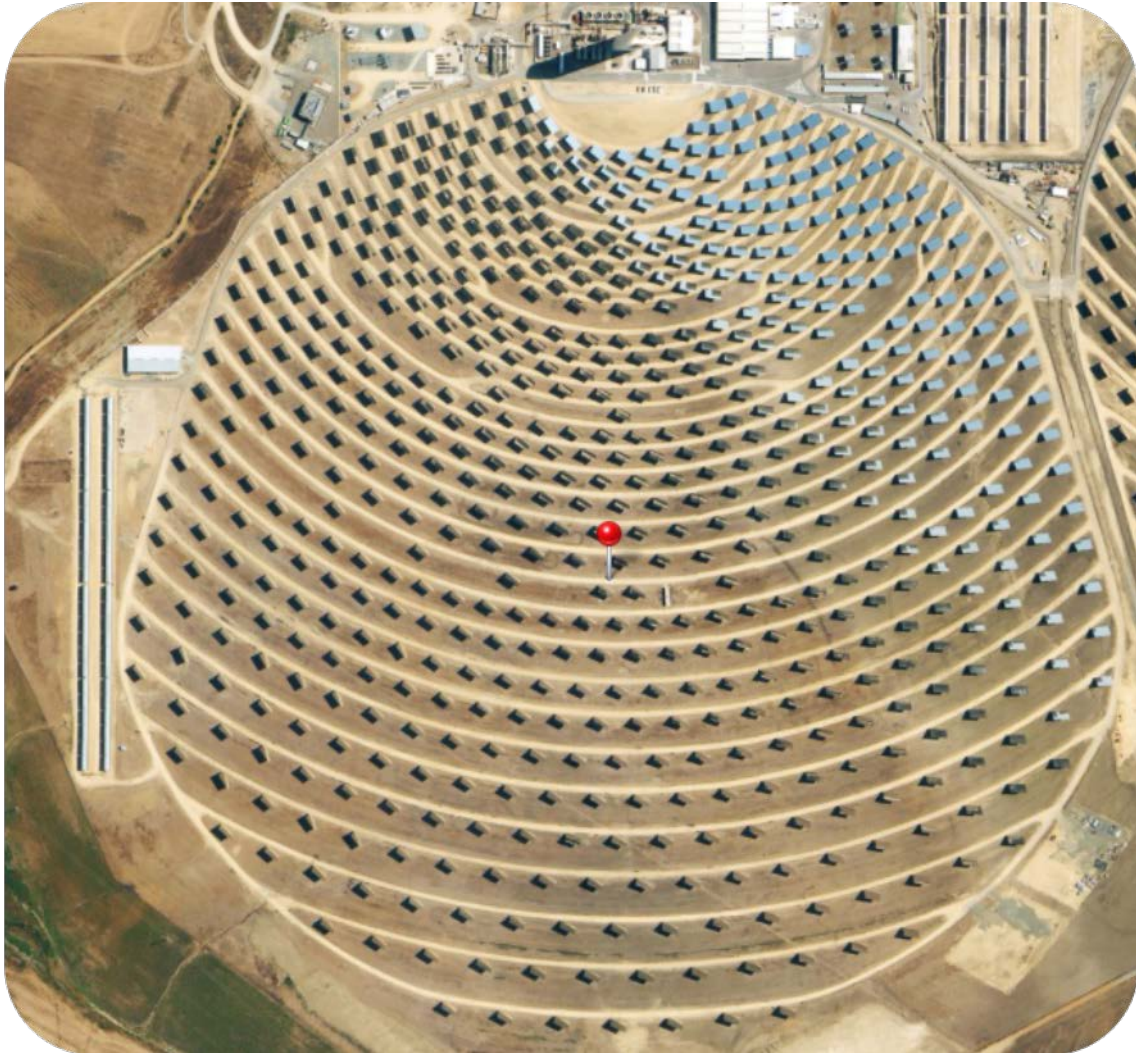
Como se ha visto anteriormente, en España existen 3 centrales termosolares en operación. En este capítulo se describirá cada una de ellas por orden según el año de construcción de cada una: PS10, construida entre 2004 y 2007; PS20, construida entre 2006 y 2009 y, la última que se construyó en España, Gemasolar, finalizada en 2011.

### 1.3.1 PS10

Es la primera central termosolar con un receptor central, su construcción acabó en 2007 y está situada en Sanlúcar la Mayor (Sevilla). En la ilustración 22 se puede situar en el mapa de España y en la 23 una foto de la central:



Ilustración 22: Ubicación de Sanlúcar la Mayor (Fuente: Google Maps).



**Ilustración 23: Central termosolar PS10 (Fuente: Google Maps).**

Esta central cuenta con 624 heliostatos y una torre de 114 metros de alto en un terreno de 60 hectáreas. Produce una potencia de 11MW, es decir, está diseñada para abastecer a 5.500 hogares, lo que supondría una reducción de 6.000 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

En lo alto de la torre, se produce vapor saturado a 275°C usado para un ciclo de vapor, y su eficiencia de conversión energética es del 17%.

Esta primera central termosolar es propiedad de la empresa española Abengoa Solar. Su inversión inicial para la construcción fue de unos 35 millones de



euros, produce aproximadamente 23400 MWh y, de acuerdo a los parámetros de retribución a las energías verdes, fijados por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, recibe 271€ por MWh producido. Esto supone un montante recibido de 6,3 millones de euros anuales hasta este año, ya que el decreto ha sido derogado.

### 1.3.2 PS20

La planta PS20 se terminó de construir en 2009, por lo que es más nueva e innovadora que la anterior. Como su propio nombre indica, tiene una potencia de 20 MW; está situada al lado de PS10 y en la ilustración 24 se pueden observar las dos juntas: PS10, que es la más pequeña a la izquierda, y PS20 a la derecha:



**Ilustración 24: La centrales termosolares PS10 y PS20 (Fuente: Google Maps).**

PS20 cuenta con un terreno de 85 hectáreas, sembrado con 1255 heliostatos y una torre con 160 metros de altura. En este caso, la planta es capaz de abastecer a 10.000 hogares o, lo que es lo mismo, evita la emisión de 12.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

En la fotografía 25 se puede observar más de cerca la planta y cómo los heliostatos concentran la radiación sobre la parte alta de la torre.



**Ilustración 25: Planta termosolar PS20 (Fuente: Daniel G.M. flickr).**

La configuración que tiene, en este caso, el campo de heliostatos es de lágrima, es decir, que la torre está situada lo más al sur posible del campo de heliostatos .

### 1.3.3 Gemasolar

Es la planta termosolar con receptor central más moderna que se ha construido, de momento, en España. Su construcción finalizó en el 2011. Está situada en Fuentes de Andalucía, Sevilla como se aprecia en la ilustración 26:



Ilustración 26: Localización de Gemasolar en España (Fuente: Google Maps).

Esta planta tiene una potencia de 19,9MW y está emplazada en un campo de 185 hectáreas con 2650 heliostatos. Es capaz de suministrar energía a 25.000 hogares, evitando la emisión de 30.000 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>. Se muestra una fotografía de la planta vista desde arriba, en la fotografía 27:





Ilustración 27: Gemasolar vista desde arriba (Fuente: Google Maps).

En la siguiente se aprecia mejor la planta:

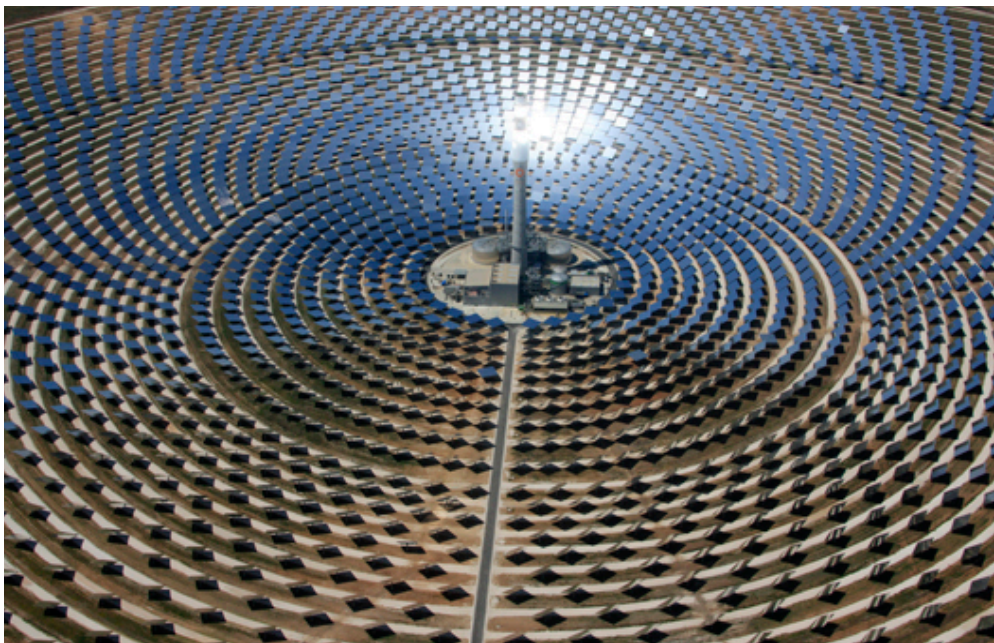


Ilustración 28: Planta termosolar Gemasolar (Fuente: Torresol Energy).



El detalle innovador de esta planta es el sistema de almacenamiento térmico el cual permite a la planta abastecer de energía durante 15 horas sin necesidad de que esta sea producida. En las dos plantas anteriores esto era imposible debido a que su capacidad de almacenamiento era solo de 1 hora.





## 3. TEORÍA

### 3.1 CICLO DE POTENCIA

Una planta termosolar no produce energía por sí misma, sino que esta se encarga de calentar un fluido térmico que, posteriormente, se utilizará en un ciclo de potencia para obtener energía. Por ello, la primera parte que hay que estudiar para diseñar una central termosolar es el ciclo de potencia.

Antes de empezar a diseñar cualquier parte del ciclo, se necesita decidir qué tipo de ciclo de potencia vamos a utilizar en nuestra central termosolar, ya que se puede usar cualquiera de las variantes de los dos ciclos explicados anteriormente: Rankine y Brayton.

Consultada y analizada la bibliografía sobre dicho apartado, se llega a la conclusión de que utilizar el ciclo Brayton operando con aire calentado directamente en un receptor central es una opción muy prometedora para un futuro a medio y largo plazo por las siguientes razones:

- El ciclo Rankine utiliza temperaturas más bajas debido a que solamente se tiene que provocar el cambio de estado del agua y esto conlleva un menor coste energético. Sin embargo, el ciclo Brayton trabaja con aire a muy altas temperaturas (puede llegar a alcanzar los 1300°C si los materiales con los que se fabrican sus componentes lo permiten), pero este nivel térmico alcanzado permite obtener un rendimiento mayor en el total del proceso.
- La inversión en equipos de un ciclo Brayton es menor que en un ciclo Rankine de vapor.

- El consumo de agua de refrigeración, y reposición del fluido de trabajo, en un ciclo Brayton es nulo, lo que le hace más idóneo en regiones con escasez de agua, las cuales suelen ser también las de más insolación.

Una vez seleccionado el ciclo de potencia a utilizar en la central, el siguiente paso es fijar la potencia que se quiere obtener de este ciclo. En función de esto, hay que diseñar el resto de componentes de la central. Consultado el estado actual de esta tecnología, se observa que se están diseñando centrales termosolares con receptor central de hasta 377 MW, como el proyecto de Ivanpah que se puede apreciar en la ilustración 29:



**Ilustración 29: Instalaciones de Ivanpah (Fuente: [raredelights.com](http://raredelights.com)).**

Pero la mayoría de las construidas actualmente apenas sobrepasan los 20 MW, por lo que lo más lógico sería escoger un valor más cercano a estos 20 MW. Esta recomendación se debe a que se tiene mucha más información y más contrastada que si se toma un valor cercano a las centrales más punteras que poseen esta tecnología y que, actualmente, están poco testadas.

Una vez decidido el tipo de ciclo que se va a utilizar en nuestra planta y la potencia que pretendemos obtener de él, hay que empezar a diseñar el ciclo de potencia; para ello utilizaremos los desarrollos matemáticos explicados en libro *Fundamentos de termodinámica técnica*, escrito por M. J. Moran y H. N. Shapiro.



Aparte de los componentes normales del ciclo, compresor y turbina, hay un receptor y una serie de conductos y codos para transportar el fluido térmico, en este caso aire, de un componente a otro. Todos estos componentes tienen unas consecuencias sobre el fluido que hay que analizar mediante las ecuaciones explicadas en el libro *Mecánica de Fluidos*, escrito por F.M. White pero, primero, se empezará a calcular y diseñar el ciclo de potencia, comenzando el compresor.

### 3.1.1 El compresor

Para comenzar a analizar el ciclo se necesita fijar las condiciones iniciales. Si se usa como fluido térmico aire atmosférico, como en el caso del presente trabajo, se parte de las propiedades atmosféricas de este fluido vehicular.

La siguiente tabla es un ejemplo de las propiedades que se necesitan:

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| <b>Temperatura [K]</b>          | 303     |
| <b>Presión [Pa]</b>             | 101.325 |
| <b>Velocidad del aire [m/s]</b> | 5       |

**Ilustración 30: Propiedades del aire atmosférico (Fuente: Propia).**

Antes de entrar al compresor, hay un filtro que elimina las posibles impurezas que pueda haber en el aire, y una etapa de admisión, que adecua la velocidad del aire a la velocidad de admisión que se usará el compresor.

Primeramente es necesario calcular las dimensiones del tubo que se va a utilizar para coger el aire procedente de la atmósfera. Para saber el diámetro se parte de la ecuación del gasto másico en un tubo cuya sección se toma circular por simplicidad:



$$m_a = \rho \cdot v_{atm} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (1)$$

Por lo tanto, si lo que se quiere calcular es el diámetro, se obtiene la siguiente expresión:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot m_a}{\rho \cdot v_{atm} \cdot \pi}} \quad (2)$$

Después del tubo de admisión de aire está el filtro, que produce una pérdida de carga según la siguiente expresión:

$$\Delta P_{filtro} = 0,15 \cdot g \cdot \rho_{atm} \quad (3)$$

Y, finalmente, justo antes de entrar al compresor hay una contracción para ajustar la velocidad del aire a la velocidad de trabajo en el compresor, cuyo valor típico es de unos 100 m/s.

De nuevo, se debe calcular el diámetro necesario para introducir el aire a esa velocidad, según la ecuación 2. Debido a que se pretende aumentar la velocidad, se necesitará un estrechamiento del tubo.

Esta contracción produce una pérdida de carga, que viene dada por la siguiente constante:

$$K_{contracción} = 0,46 \quad (4)$$

Por lo tanto, aplicando la expresión de Bernouilli con pérdidas desde la entrada de aire hasta la entrada del compresor, se obtiene la siguiente expresión, mediante la cual se podrá calcular la presión de entrada al compresor,  $P_{entrada\ al\ compresor}$ :



$$P_{\text{entrada al compresor}} = P_{\text{atm}} - \Delta P_{\text{filtro}} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{atm}} \cdot (v_{\text{atm}}^2 - v_{\text{compresor}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{atm}} \cdot v_{\text{compresor}}^2 \cdot (K_{\text{contracción}}) \quad (5)$$

A continuación, se estudia el comportamiento del compresor propiamente dicho. Con los datos de entrada al compresor y conociendo las características de trabajo del compresor, se pueden calcular las propiedades a la salida del mismo.

Las características de operación del compresor que se deben conocer son:

- El ratio o tasa de compresión,  $r_p$ , que es la presión de salida del compresor dividida por la presión de entrada.
- El rendimiento isentrópico,  $\eta_{\text{isentrópico\_compresor}}$ .

El valor de  $r_p$  en los compresores actuales está en torno a 20, y el rendimiento isentrópico de un compresor moderno suele superar el 85%. Por lo tanto, a continuación, se calculan las propiedades de salida del compresor.

La presión a la salida del compresor viene dada por:

$$P_{\text{salida\_compresor}} = P_{\text{entrada\_compresor}} \cdot r_p \quad (6)$$

Sin embargo, para calcular la temperatura a la salida del compresor hay que calcular antes el trabajo que realiza el compresor.

Aplicando un balance de energía en el compresor se obtiene la potencia mecánica del compresor:

$$W_{\text{compresor}} = m_a \cdot c_p \cdot (T_{\text{entrada}} - T_{\text{salida}}) \quad (7)$$



Por lo tanto se puede obtener la temperatura de salida del compresor de la siguiente manera:

$$T_{salida} = T_{entrada} - \frac{W_{compresor}}{m_a \cdot c_p} \quad (8)$$

El único dato que falta de esta ecuación es la potencia del compresor, pero se puede obtener si se sigue el desarrollo matemático siguiente:

$$W_{compresor} = \frac{W_{compresor\_ideal}}{\eta_{isentropico\_compresor}} \quad (9)$$

El valor de la potencia ideal del compresor,  $W_{compresor\_ideal}$ , se puede calcular según la siguiente fórmula:

$$W_{compresor\_ideal} = m_a \cdot c_p \cdot (T_{entrada} - T_{salida\_ideal}) \quad (10)$$

Y de esta expresión, la única variable que se desconoce es la temperatura absoluta (en Kelvin) de salida ideal,  $T_{salida\_ideal}$ , que se obtiene de la siguiente manera:

$$T_{salida\_ideal} = T_{entrada} \cdot \left( \frac{P_{entrada}}{P_{salida}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (11)$$

De esta manera, se conocen la temperatura y presión una vez que el fluido ha pasado por el compresor.

A la salida del compresor existe un difusor para adecuar la velocidad a la que salen los gases para que la pérdida de carga no sea exagerada.



La pérdida de carga que produce un difusor viene provocada por las diferencias de diámetros que existen antes y después de él, siguiendo la siguiente expresión:

$$K_{difusor} = 0,14 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_{antes\_difusor}}{D_{despues\_difusor}} \right)^2 \right] \quad (12)$$

A continuación, se ha colocado un codo para reencauzar el fluido en dirección vertical y subirlo al receptor en lo alto de la torre, ya que tanto el compresor como la turbina no se situarán en la torre sino que se emplazarán a nivel del suelo junto con el resto que equipos de la planta. La pérdida de carga que produce un codo viene dada por la siguiente constante:

$$K_{codo} = 0,95 \quad (13)$$

El siguiente paso es subir el fluido térmico hasta lo alto de la torre para hacerle pasar por el receptor, lo que produce unas pérdidas de carga debido a la rugosidad de los conductos y al cambio de altura que se debe superar.

Posteriormente a esta subida, el fluido se encuentra con un nuevo codo para redirigir el flujo en dirección al receptor que provoca una pérdida de carga según la fórmula 13 y, seguidamente, un nuevo tramo recto que hará caer la presión debido a la rugosidad de los conductos.

Todas estas pérdidas posteriores al compresor se recogen en la siguiente expresión:



$P_{entrada_{receptor}}$

$$\begin{aligned} &= P_{salida_{compresor}} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{compresor} \cdot (v_{compresor}^2 - v_{tubo}^2) \\ &+ \rho_{compresor} \cdot g \cdot (z_{compresor} - z_{receptor}) \\ &- \frac{1}{2} \cdot \rho_{atm} \cdot v_{compresor}^2 \cdot \left( \frac{\lambda \cdot L_{tuberia}}{D_{tuberia}} + K_{difusor} + 2 \cdot K_{codo} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Siendo  $(z_{compresor} - z_{receptor})$ , la diferencia de cotas entre el compresor y el receptor, es decir, la altura de la torre. Y  $\lambda$ , el factor de fricción, calculado mediante la ecuación de Colebrook, que tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (15)$$

Definiendo  $k$  como la rugosidad del conducto, que el valor numérico depende del material y del acabado que se le haya aplicado.

### 3.1.2 El receptor

El diseño del receptor se ha realizado en dos fases. En una primera fase, que forma parte del diseño general del ciclo de potencia, se estiman las dimensiones básicas preliminares del receptor y únicamente se calcula la pérdida de carga que produce sobre el fluido el atravesar el receptor. En una segunda fase se calculan las dimensiones del receptor más en detalle y se acaba de diseñar dicho elemento.

Para calcular la pérdida de carga que se produce en el receptor hay que conocer algunas de las propiedades del material con el que está fabricado el receptor. Estas propiedades son la porosidad,  $\varepsilon$ , y el diámetro del poro,  $d_p$ .

La fórmula que se utiliza para calcular la pérdida de carga en el receptor es la ley de Darcy y se rige por la siguiente función:





$$\Delta P_{receptor} = 150 \cdot \frac{H \cdot \rho \cdot v_{receptor}^2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left[ \frac{1 - \varepsilon}{Re} + 1,75 \right]}{\varepsilon^3 \cdot d_p} \quad (16)$$

Aquí concluyen los cálculos de esta primera fase de diseño del receptor relacionada con el ciclo de potencia.

### 3.1.3 La turbina

Antes de entrar en la turbina, el fluido térmico debe ir desde el receptor, en lo alto de la torre, hasta la turbina que se encuentra al nivel del suelo, por lo que debe hacer el camino inverso que hizo para pasar del compresor al receptor.

A la salida del receptor existe un tramo de conducto que producirá una pérdida de carga dependiendo de la rugosidad del material (ya se comentaron anteriormente las propiedades de los tubos). A continuación, el fluido térmico se encuentra con un codo y, después, con otro tramo recto para hacerle descender desde lo alto de la torre hasta el nivel del suelo.

Finalmente, antes de entrar a la turbina hay un estrechamiento para adaptar la velocidad del fluido en los tubos a la velocidad de trabajo de la turbina, que habitualmente es algo mayor que la del compresor, cuyo valor se ha considerado igual a 120m/s.

Por lo tanto, basándose en las ecuaciones estudiadas anteriormente, 4, 13 y 15, se obtiene la siguiente ecuación para la pérdida de carga entre el receptor y la turbina:

$$\begin{aligned} P_{entrada_{turbina}} = P_{salida_{receptor}} &+ \frac{1}{2} \cdot \rho_{receptor} \cdot (v_{receptor}^2 - v_{turbina}^2) \\ &+ \rho_{receptor} \cdot g \cdot (z_{receptor} - z_{turbina}) \\ &- \frac{1}{2} \cdot \rho_{receptor} \cdot v_{turbina}^2 \cdot \left( \frac{\lambda \cdot L_{tuberia}}{D_{tuberia}} + K_{contracción} + 2 \cdot K_{codo} \right) \end{aligned} \quad (17)$$



En cuanto a lo que es la turbina propiamente dicha, se usará una estimación de la presión de salida de la turbina, la cual se supondrá igual a la presión atmosférica.

Como ya se conoce la presión a la entrada y salida de la turbina, se puede calcular la relación de presiones en la turbina,  $r_t$ , que se correspondería con la siguiente ecuación:

$$r_t = \frac{P_{entrada\_turbina}}{P_{salida\_turbina}} \quad (18)$$

Una vez que se conoce esta relación, se puede calcular la temperatura de entrada a la turbina siguiendo el desarrollo matemático que se detalla a continuación.

Si se sustituye la ecuación 74, que relaciona la temperatura de entrada a la turbina con la temperatura de salida mediante el rendimiento isentrópico y la relación de presiones, en la siguiente fórmula del trabajo de la turbina:

$$W_{turbina} = m_a \cdot c_p \cdot (T_3 - T_4) \quad (19)$$

Se obtiene la siguiente igualdad:

$$T_{entrada\_turbina} = \frac{W_{turbina}}{m_a \cdot c_p \cdot \eta_{st} \cdot \left(1 - r_t^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}\right)} \quad (20)$$

Y mediante la igualdad de la ecuación 74, se puede obtener el valor numérico de la temperatura a la salida de la turbina.

Por lo tanto, como ya se conocen las relaciones de temperaturas a la entrada y la salida de la turbina y la presión de entrada de la turbina, se calculará la presión a la salida de la turbina mediante la siguiente expresión:



$$P_4 = P_3 \cdot \left( \frac{T_3}{T_{4ideal}} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \quad (21)$$

Pero de esta igualdad se desconoce la temperatura ideal de salida de la turbina, es decir,  $T_{4ideal}$ . Así que esta temperatura se puede calcular a través del trabajo ideal de la siguiente manera:

$$W_{turbina\_ideal} = \frac{W_{turbina}}{\eta_{isentrópico\_turbina}} \quad (22)$$

Y la temperatura de salida ideal se obtiene, entonces:

$$T_{4ideal} = T_3 - \frac{W_{turbina\_ideal}}{m_a \cdot C_p} \quad (23)$$

Por lo que, volviendo a la expresión 21 con estos datos, se obtiene la presión de salida de la turbina.

Para finalizar los cálculos y simulación del ciclo de potencia de la planta termosolar, ya solo queda calcular las pérdidas de carga que conlleva expulsar los gases de salida de la turbina a través de una chimenea.

Tras salir de la turbina, los gases se topan con un difusor, ya que la velocidad de trabajo de la turbina (120m/s) produciría una pérdida de carga demasiado grande, por lo que, se ha establecido una velocidad del fluido en los tubos de 10m/s.

La pérdida de carga que se produce debido al difusor ya se ha explicado y sigue la función 12, descrita anteriormente.



Después del difusor, el fluido térmico se encuentra un codo para reencauzar el flujo en la dirección de la chimenea, cuya constante de pérdidas viene dada en la expresión 13.

Y, finalmente, el fluido sube por la chimenea, que suele poseer una altura de unos 5 metros aproximadamente para turbinas de media potencia que no liberan productos de combustión.

Si juntamos todas estas pérdidas de carga, desde que el fluido sale de la turbina hasta que es expulsado en lo alto de la chimenea, la expresión para la presión de salida quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} P_{salida} = P_{salida_{turbina}} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{turbina} \cdot (v_{turbina}^2 - v_{tubo}^2) + \rho_{turbina} \cdot g \\ \cdot (z_{turbina} - z_{chimenea}) \\ - \frac{1}{2} \cdot \rho_{turbina} \cdot v_{turbina}^2 \cdot \left( \frac{\lambda \cdot L_{chimenea}}{D_{chimenea}} + K_{codo} + K_{difusor} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

De esta manera se conocería la presión a la salida del ciclo y acabaría ya el cálculo de las propiedades en todos los puntos del ciclo de potencia.

## 3.2 EL RECEPTOR

El receptor es el elemento de nuestra planta termosolar encargado en transformar la radiación concentrada de los heliostatos en calor transmitido al fluido térmico, para después extraer de esta la potencia.

Desde un principio se decidió que nuestro receptor iba a ser volumétrico por que permite calentar directamente el gas con radiación solar procedente de todas las direcciones, pero existen muchos tipos de receptores: tubulares, de cavidad, con partículas suspendidas, con metal fundido, etc. En las siguientes imágenes se pueden observar algunos de ellos:

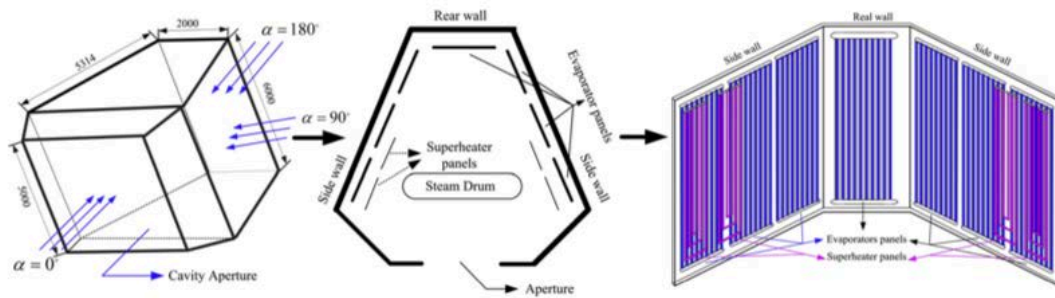


Ilustración 31: Receptor de cavidad (Fuente: Q. Yu et al. Solar Energy).



Ilustración 32: Receptor tubular (Fuente: Q. Yu et al. Solar Energy).



Ilustración 33: Receptor con metales fundidos (Fuente: Q. Yu et al. Solar Energy).



A este abanico de posibilidades del receptor hay que sumarle la gran variedad de materiales con los que se pueden fabricar. En nuestro caso, como es un receptor volumétrico se usará un material poroso que va a ser el encargado de transferir el calor al fluido térmico.

Para poder realizar los cálculos de forma adecuada se han de conocer algunas características del material, como son la porosidad del material,  $\varepsilon$ , medida en tanto por ciento y el diámetro del poro,  $d_p$ , medido en unidades de longitud del sistema internacional, es decir, metros.

Por lo tanto, una vez conocidos todos los datos necesarios del material ya se pueden realizar los cálculos necesarios para acabar de diseñar el receptor de nuestra central termosolar. Estos cálculos se realizan mediante las ecuaciones que se encuentran en *Fundamentos de Transferencia de Calor y Masa*, escrito por F. P. Incropera y D. P. De Witt.

Lo primero que hay que calcular, antes de adentrarse en cualquier operación del receptor, es el calor que es necesario transmitir al fluido térmico para cumplir los cálculos que se llevaron a cabo en la parte de diseño del ciclo de potencia. Por lo que:

$$Q_{necesario} = m_a \cdot C_p \cdot (T_{salida} - T_{entrada}) \quad (25)$$

Y este es el calor que se necesita transferir al material del receptor para que, a su vez, el receptor transmita por convección al fluido térmico la potencia térmica requerida. La transferencia de calor en el receptor se producirá por conducción en el seno del material poroso que compone dicho receptor.

Para realizar el estudio de la transferencia de calor del receptor, se toma la hipótesis de que todo el material poroso del receptor se encuentra a la misma temperatura debido a que los gradientes térmicos interiores de una parte del material poroso a otro son despreciables en comparación con la diferencia de



temperatura entre el material poroso y el gas o entre el material poroso y el exterior. Esto es debido a la alta temperatura que adquiere el material poroso, pues las pérdidas que se ocasionan, por convección o por radiación al exterior, serán despreciables (en primera aproximación) con respecto a la cantidad de calor que absorbe el receptor del calor concentrado por los heliostatos. Además los gradientes térmicos en el interior del colector también se considerarán reducidos debido al bajo valor del calor específico del aire que circula por el interior del material poroso y a que la velocidad del gas en el interior no es elevada.

Primero, habrá que estudiar la conducción del material poroso al fluido térmico para determinar las dimensiones del receptor. Buscando en la bibliografía se llegó a la siguiente correlación para determinar el Nusselt de convección desde el material poroso hasta el aire que circula entre medias de él:

$$Nu_{convección} = 0,76 \cdot Re^{0,4} \cdot Pr^{0,37} \quad (26)$$

Siendo  $Nu_{convección}$ , el número de Nusselt de la convección, del que se puede obtener el coeficiente de transferencia de calor,  $h_{convección}$ , mediante la siguiente igualdad:

$$Nu_{convección} = \frac{h_{convección} \cdot D_{poro}}{k} \quad (27)$$

Siendo  $k$  el coeficiente de conductividad térmica del fluido. Y, volviendo a la ecuación 26, el número de Reynolds,  $Re$ , y el número de Prandtl,  $Pr$ , del aire que circula por el material poroso, se definen de la siguiente manera:

$$Re_{convección} = \frac{\rho \cdot u_{poro} \cdot D_{poro}}{\mu} \quad (28)$$

$$Pr_{convección} = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (29)$$



Definiendo  $u_{poro}$ , de la siguiente manera:

$$u_{poro} = \frac{u_{fluido}}{\varepsilon} \quad (30)$$

Siendo  $\varepsilon$  la porosidad del material definida en tanto por uno.

Una vez que se ha calculado el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $h_{convección}$ , mediante la igualdad 27, se puede calcular el calor que se transfiere al fluido por unidad de volumen del receptor:

$$q = h_{convección} \cdot S'''_p \cdot (T_{material} - T_{media\_fluido}) \quad (31)$$

Definiendo  $S'''_p$  como el ratio entre la superficie de intercambio de calor de los poros en contacto con el fluido y el volumen del receptor (material poroso y poros), que tiene unidades de  $m^2/m^3$

Y la  $T_{media\_fluido}$  es la media entre la temperatura de entrada y salida del fluido térmico (aire) en el receptor.

$$T_{media\_fluido} = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2} \quad (32)$$

Se calcula el volumen de receptor dividiendo el calor que se necesita entre el calor por unidad de volumen que es transferido por convección al fluido gaseoso que circula a través del material poroso:

$$V_{receptor} = \frac{Q_{necesario}}{q} \quad (33)$$

E investigando en la bibliografía, se concluye que las dimensiones idóneas, por las que se minimiza la pérdida de calor hacia el exterior, están dadas por un





diámetro que mide la mitad de la altura del receptor. Por lo tanto, el volumen del receptor se calcula con:

$$V_{receptor} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4} \quad (34)$$

Y cumpliendo la relación:

$$D = \frac{H}{2} \quad (35)$$

Una vez que se conocen las dimensiones del receptor y su transferencia de calor por convección al gas, se puede calcular la temperatura a la que se encuentra el material. Para ello se recurre a la siguiente expresión de flujo interno calentado por un material a temperatura uniforme (Incropera y De Witt, Fundamentos de Transferencia de Calor):

$$\frac{T_S - T_m(x)}{T_S - T_{m,e}} = e^{-\frac{h \cdot P_c \cdot x}{m_a \cdot C_p}} \quad (36)$$

Una vez que se conoce el funcionamiento interno del receptor, este es protegido con una cubierta conductora de calor de tipo metálico. Esta cubierta produce una pequeña caída de la temperatura del material con respecto a la temperatura que se alcanza en el exterior, pero que suele ser despreciable comparada con las temperaturas alcanzadas. Por el mismo motivo, se considerará un efecto térmico despreciable en otros elementos metálicos, tales como las uniones intermedias dadas por el ensamblaje de las porciones de material poroso utilizadas para construir el receptor.

Diseñado el receptor, para calcular todo el calor que se necesita concentrar en el receptor mediante los heliostatos, se debe calcular también las pérdidas del receptor por convección y radiación hacia el ambiente. En la ilustración 34 se pueden observar las pérdidas que tiene nuestro receptor:

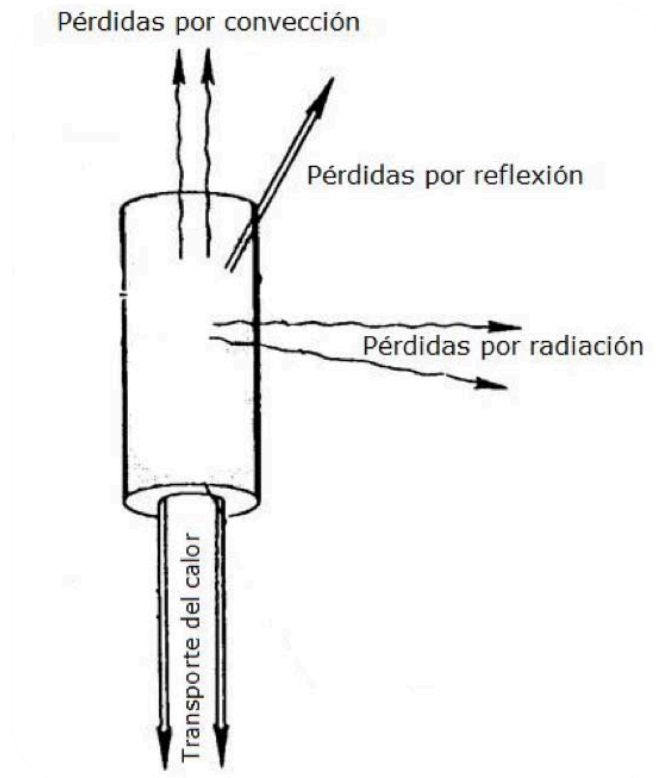


Ilustración 34: Pérdidas de nuestro receptor (Fuente: TFG Alfonso Gómez Cristóbal).

Primero se calculan las pérdidas con convección desde la superficie externa del receptor hacia el aire exterior. Antes de realizar cualquier tipo de cálculo, es necesario saber de qué tipo de convección se trata, si es libre, forzada o mixta. Para ello, hay que calcular el número de Grashof y el número de Reynolds de la convección con el aire.

$$Gr_{convección} = \frac{\rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_{mat} - T_{atm}) \cdot H^3}{\mu} \quad (37)$$

$$Re_{convección} = \frac{\rho \cdot u_{viento} \cdot H_{receptor}}{\mu} \quad (38)$$

Y comparando el Grashof con el Reynolds se sabrá si se está frente a una convección libre, forzada o mixta siguiendo la siguiente tabla:



| $Gr_{convección} / Re_{convección}^2$ | Convección |
|---------------------------------------|------------|
| $\ll 1$                               | Forzada    |
| $\gg 1$                               | Libre      |
| $\approx 1$                           | Mixta      |

Ilustración 35: Clasificación de la convección según el número de Grashof y el de Reynolds

Sabiendo qué tipo de convección es, ya se puede obtener una correlación y calcular el coeficiente de transferencia de calor. En este caso, se hará para una convección libre, aplicando la correlación de Churchill y Chu:

$$Nu_{convección} = \left[ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left\{ 1 + \left( \frac{0,429}{Pr_{convección}} \right)^{9/16} \right\}^{8/27}} \right]^2 \quad (39)$$

Siendo  $Ra$  el número de Rayleigh que se define como:

$$Ra = Gr_{convección} * Pr_{convección} \quad (40)$$

Y el  $Pr_{convección}$ , el número de Prandtl definido en la ecuación 29, pero evaluando las propiedades a la temperatura atmosférica en este caso.

El coeficiente de transferencia de calor por convección se obtendrá de la misma manera que se obtuvo el de convección, mediante la igualdad 27.

Por lo tanto, el calor perdido por convección hacia el aire exterior se obtiene de la siguiente expresión:

$$q_{convección} = h_{convección} \cdot (T_{material} - T_{ambiente}) \quad (41)$$



Pero este calor es el calor por unidad de superficie externa del receptor, de manera que habrá que calcular el calor total perdido por convección de la siguiente manera:

$$Q_{convección} = q_{convección} \cdot A_{receptor} \quad (42)$$

Definiendo como el área del receptor,  $A_{receptor}$ , de la siguiente manera:

$$A_{receptor} = \pi \cdot D_{receptor} \cdot H_{receptor} \quad (43)$$

Y, a continuación, se calculará el calor perdido por radiación. Para ello, se sigue la hipótesis del cuerpo gris difuso, que supone que la emisividad y la absorptancia tienen el mismo valor. Por lo que el calor viene definido mediante la siguiente ecuación:

$$q_{radiación} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{material}^4 - T_{alrededores}^4) \quad (44)$$

Siendo  $\varepsilon$  la emisividad del material;  $\sigma$ , la constante de Stefan-Boltzmann, que tiene un valor de:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Y la  $T_{alrededores}$ , que es la temperatura equivalente de radiación del cielo, que es un dato que se suele tomar alrededor de los  $-20^\circ\text{C}$  (en la ecuación 44 se introduce en unidades de temperatura absoluta).

Como ya ocurrió anteriormente este calor de radiación que se ha calculado es calor por superficie, por lo que el calor total perdido por radiación viene definido de la siguiente manera:

$$Q_{radiación} = q_{radiación} \cdot A_{receptor} \quad (45)$$



Por lo tanto, una vez llegados a este punto, ya se puede calcular la radiación que es necesaria concentrar en nuestro receptor para poder calentar el fluido térmico hasta las temperaturas que obtuvimos a la hora de diseñar el ciclo de potencia. Este calor viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_{receptor} = Q_{poroso} + Q_{convección} + Q_{radiación} \quad (46)$$

Y, a continuación, se debe diseñar el campo de heliostatos de tal forma que se concentre sobre el receptor esta cantidad de calor.

Pero el receptor no absorbe toda la radiación que le llega ya que parte es absorbida y parte es reflejada por lo que esta cantidad de calor es la que hay que absorber. Así, la cantidad de calor que se concentrará sobre nuestro receptor será:

$$Q_{campo\_heliostatos} = Q_{absorbida\_receptor} + Q_{reflejada\_receptor} \quad (47)$$

Siendo  $Q_{absorbida\_receptor}$  la que hemos definido en la ecuación numero 46 como  $Q_{receptor}$ , y  $Q_{reflejada\_receptor}$ , viene definida por las propiedades del material. Por lo que, finalmente, el calor que se deberá concentrar sobre el receptor viene dado por la siguiente expresión:

$$Q_{receptor} = \frac{Q_{absorbida\_receptor}}{\alpha} \quad (48)$$

Siendo  $\alpha$ , la absorptividad de la superficie externa que recubre al material poroso.

Por lo tanto, se diseñará a continuación el campo de heliostatos necesario para que se concentre esta cantidad de radiación sobre el receptor.



### 3.3 EL CAMPO DE HELIOSTATOS

El campo de heliostatos es el encargado de concentrar la radiación sobre el receptor de la planta termosolar. Como se debe estudiar cada heliostato para diseñarlo de forma correcta y son muchas las variables a tener en cuenta (ya sea la radiación solar, el tamaño de la torre, la potencia que se desea obtener, la geometría del receptor, el tamaño del heliostato, etc.), se suelen usar programas informáticos especializados para diseñar dicho campo de heliostatos. Hay una gran cantidad de software de este tipo ya que, normalmente, cada empresa utiliza el suyo propio. Dos ejemplos de estos programas son ENSOL (desarrollado por SENER) o NSPOC (Nevada Solar Plants Optimization Code).

En este caso se van a usar varias hipótesis para el diseño simplificado de nuestro campo y así poder programarlo por nosotros mismos, sin usar software especializado.

Como se ha seleccionado un receptor volumétrico que puede recibir radiación por toda su superficie, es decir,  $360^\circ$ , el campo de heliostatos se extenderá en torno a él. Un ejemplo de esta distribución es Gemasolar, de la cual se pueden ver fotografías aéreas en apartados anteriores. Normalmente, en este tipo de campos se suelen concentrar más heliostatos en su parte norte debido a que tienen un mejor rendimiento de enfoque, ya que cada heliostato tiene un rendimiento diferente según su situación. En la ilustración 36 se puede apreciar esta variación del rendimiento:

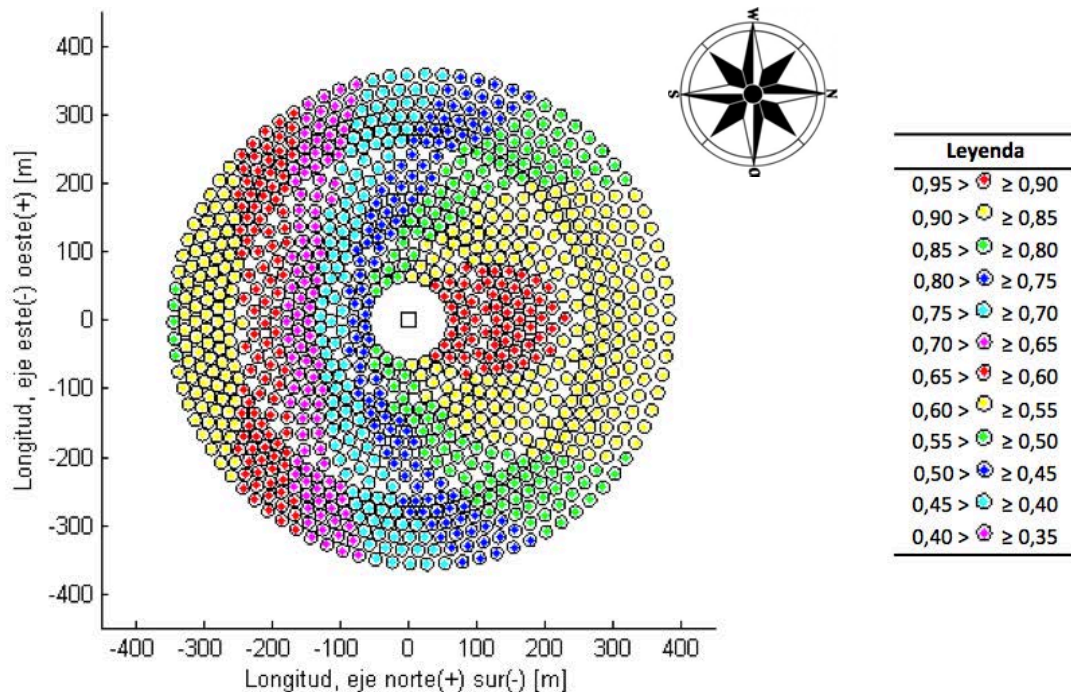


Ilustración 36: Eficiencia de los heliostatos según su situación (Fuente: TFG Andrés Carrillo).

Vamos a utilizar la simplificación de que nuestro campo será completamente circular ya que todos los heliostatos los supondremos con el mismo rendimiento. A continuación se presenta la imagen 37 con un campo de heliostatos real con este tipo de distribución comparado con un campo completamente circular:

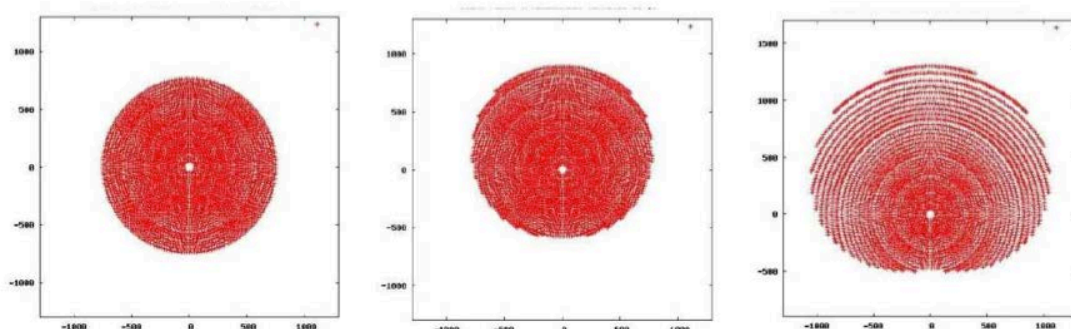


Ilustración 37: Distribuciones del campo de heliostatos simplificadas y real (Fuente: TFG Hugo Joga).

Otra de las simplificaciones que se van a utilizar es el diseño de nuestro campo de heliostatos en un día de verano a mediodía, para obtener la potencia deseada en ese momento. Ya se sabe que durante el resto de día, y del año, la



potencia extraída será menor y las condiciones de trabajo no serán óptimas pero, de esta forma, se demostrará la capacidad de diseñar el campo de heliostatos de manera preliminar para esas condiciones sin realizar un número excesivo de operaciones.

En resumen, todas estas simplificaciones se hacen debido a la no disponibilidad del soporte informático necesario para realizar dichos cálculos de forma completa.

Para comenzar el diseño del campo de heliostatos es necesario conocer los siguientes datos:

- La radiación necesaria para que el receptor caliente el agua hasta la temperatura determinada en los cálculos del ciclo.
- La radiación solar que incide sobre el lugar en el que hayamos colocado nuestra planta.
- La superficie reflectante de cada heliostato.
- La altura de la torre.

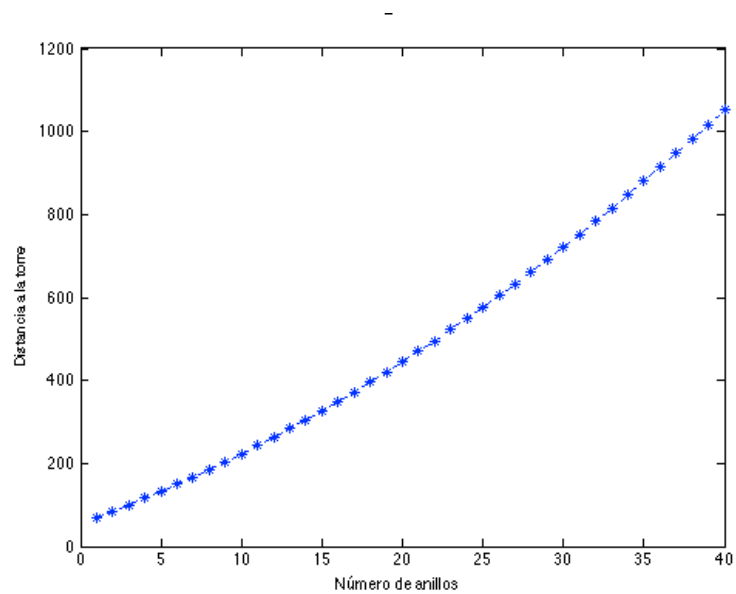
Hay que fijar cómo se van a distribuir los heliostatos a lo largo del campo. Se harán círculos concéntricos en torno a la torre central y, según aumenta la distancia con la torre, el número de heliostatos por círculo va aumentando y la distancia entre círculos también. Revisada la bibliografía sobre el tema, se ha decidido distribuir el campo de heliostatos según las siguientes funciones.

El incremento de la distancia entre círculos donde se disponen los heliostatos viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta R(i) = \sqrt{A} \cdot (1,25 + i/20) \quad (49)$$

Donde A es la superficie reflectante del heliostato e  $i$  es el número de anillo en el que se pretende realizar el cálculo. En la siguiente gráfica, ilustración 38, se aprecia cómo va aumentando la distancia al aumentar el número de anillos:





**Ilustración 38: Distancia de cada anillo a la torre (Fuente: Propia).**

El número de heliostatos en cada anillo queda determinado por la siguiente fórmula:

$$NH(i) = \frac{2\pi R(i)}{\sqrt{A} \cdot (1,5 + i/20)} \quad (50)$$

Donde  $R(i)$  es la distancia a la torre del anillo de heliostatos. Y a continuación, se muestra cómo va aumentando el número de heliostatos por anillo según aumenta la distancia a la torre.

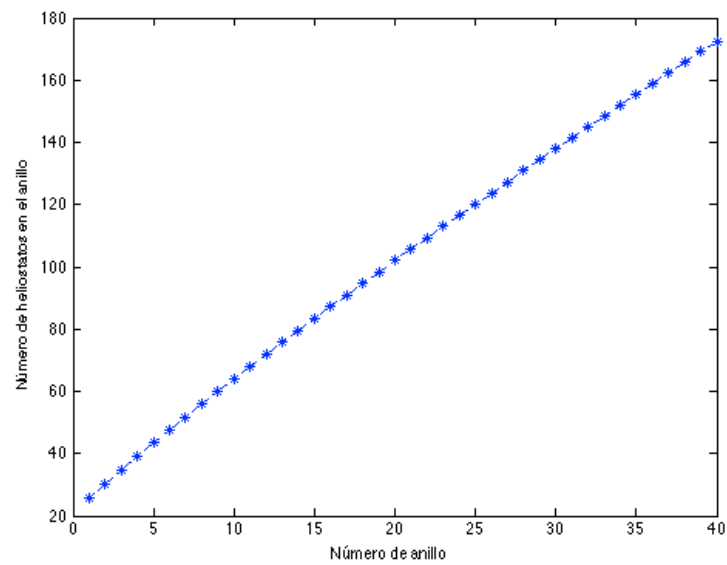


Ilustración 39: Número de heliostatos por anillo (Fuente: Propia).

Y cómo va variando el número total de heliostatos según se añaden anillos al campo:

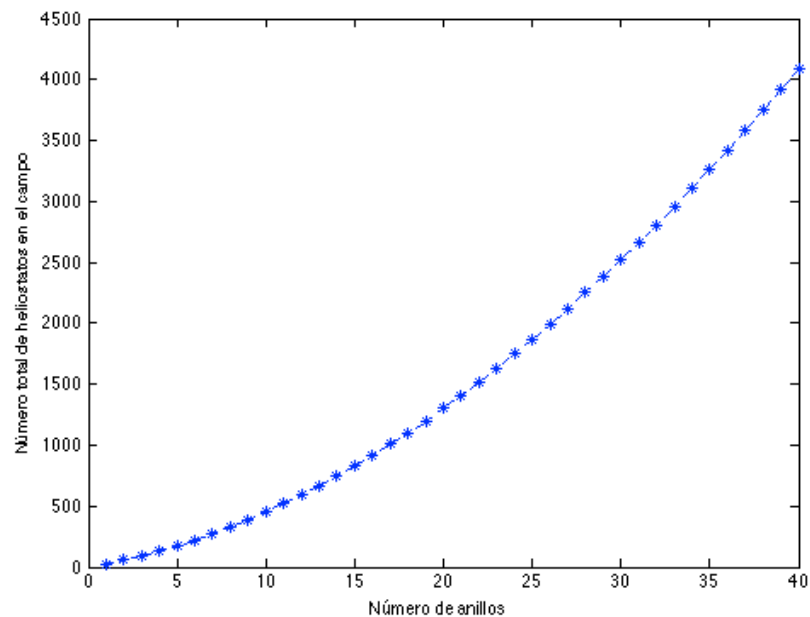


Ilustración 40: Número total de heliostatos en el campo según el número de anillos (Fuente: Propia).

Por lo tanto, si se genera un campo siguiendo estas dos fórmulas explicadas, el resultado sería el siguiente:

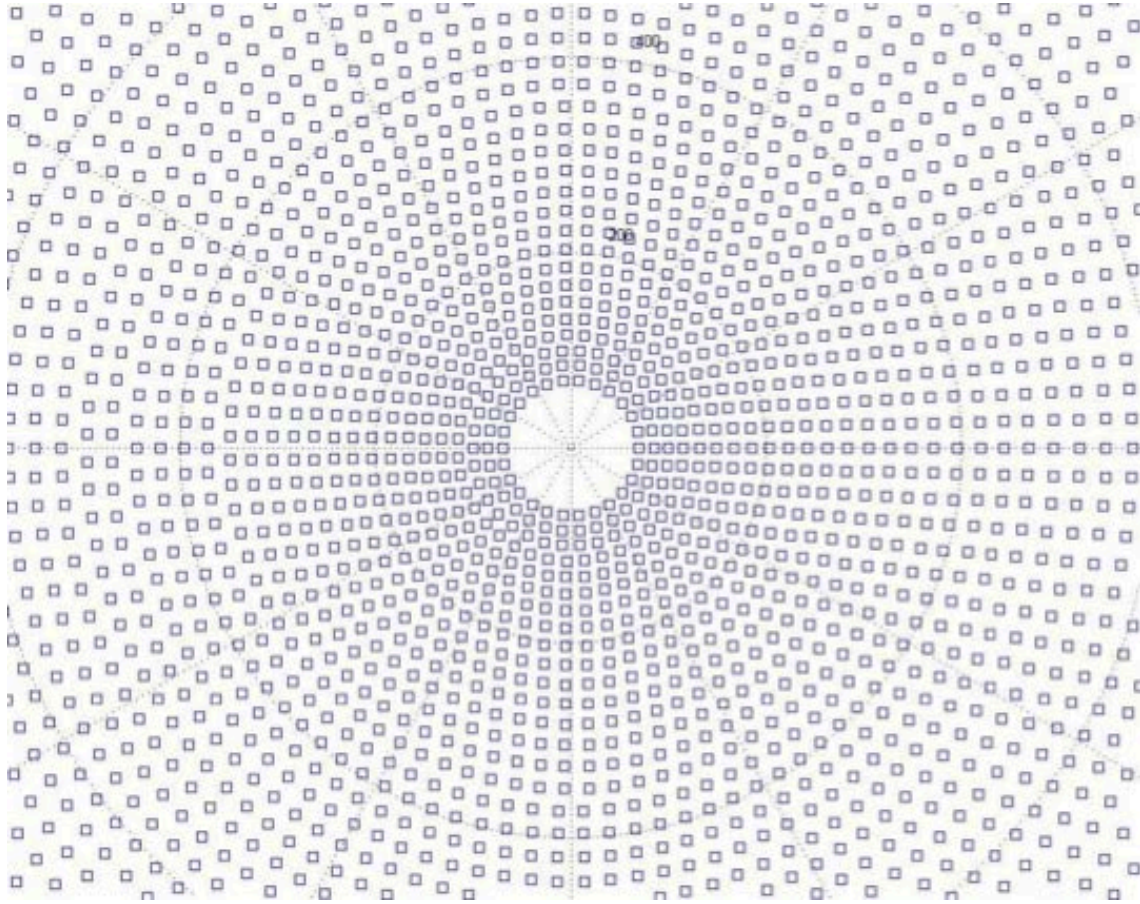


Ilustración 41: Simulación del campo de heliostatos (Fuente: TFG Hugo Joga).

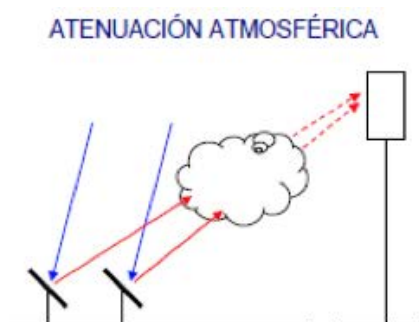
Una vez que se conoce cómo diseñar el campo de heliostatos hay que ir añadiendo heliostatos hasta conseguir concentrar la radiación necesaria dictada por la potencia que se desea obtener de la planta. Y la radiación que se concentra en el receptor sigue la siguiente fórmula:

$$Q_{\text{radiación concentrada}} = \sum \eta_{\text{heliostato}} \cdot G_0 \cdot A_{\text{heliostato}} \cdot \cos \theta \quad (51)$$

Siendo  $G_0$  la radiación solar por metro cuadrado, perpendicular al sol, que llega sobre el emplazamiento de nuestra planta,  $A_{\text{heliostato}}$  el área de cada heliostato, el factor  $\cos \theta$  indica el grado de orientación del heliostato al sol y depende de la posición del heliostato con respecto al sol y a la torre (que posteriormente explicaremos cómo se calcula), nosotros utilizaremos un valor medio para todos los heliostatos; y  $\eta_{\text{heliostato}}$  define las pérdidas de radiación de nuestro heliostato, que también se definirán a continuación.

Primero, se estudiará el concepto del rendimiento del heliostato,  $\eta_{heliostato}$ , que, como ya se ha dicho, cuantifica las pérdidas de radiación. Estas pueden tener innumerables fuentes pero, en este estudio, solo se tendrán en cuenta las pérdidas más importantes y relevantes, que son:

- **Pérdidas en la transmisión a través de la atmósfera,  $\eta_{aa}$ .** Una vez que el heliostato ha reflejado la radiación hacia el receptor, hasta que esta llega a su destino sufre una atenuación. Esta atenuación varía mucho con respecto a las condiciones atmosféricas ya que, cuanto más distancia y obstáculos existan entre el heliostato y el receptor, menor será la cantidad de radiación reflejada que llegue a su destino.



**Ilustración 42: Representación de la atenuación atmosférica (Fuente: Google Image).**

- **Pérdidas por sombras,  $\eta_s$ .** Agrupa las sombras producidas tanto entre heliostatos, como entre la torre y los heliostatos, o la sombras que pueda producir cualquier otro elemento (árboles, animales...), ya que todo esto reduce el área que puede reflejar la radiación para concentrarla en el receptor.



Ilustración 43: Representación de las pérdidas por sombras (Fuente: Google Image).

- **Pérdidas por bloqueo,  $\eta_b$ .** Son muy parecidas a las pérdidas por sombras aunque, en este caso, el elemento que las produce sobre el heliostato se interpone entre el heliostato y el receptor, no entre el heliostato y el Sol, como ocurre en las pérdidas por sombra. Normalmente, ambas pérdidas, por sombra y bloqueo, se juntan en un mismo factor,  $\eta_{sb}$ .

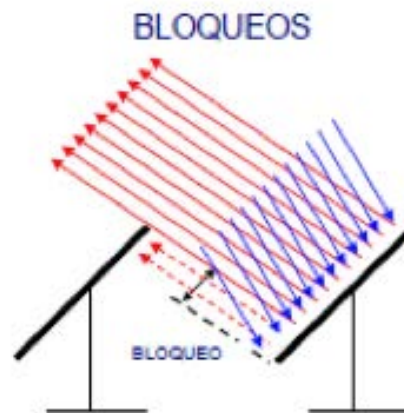


Ilustración 44: Representación de las pérdidas por bloqueo (Fuente: Google Image).

- **Pérdidas por reflectividad,  $\eta_r$ .** Los heliostatos, al igual que cualquier superficie, no reflejan la totalidad de la radiación que les llega, ya que parte es absorbida. La cantidad de radiación que reflejan depende el material: en el caso de los heliostatos suele ser bastante alta, en torno al 90%. Pero este número desciende poco a poco según se le acumula suciedad en la superficie.



- **Pérdidas en la captación de radiación en el receptor,  $\eta_{fi}$ .** Debido a posibles imperfecciones en la superficie del heliostato, una mala orientación e incluso un mal diseño, no toda la radiación reflejada llega a la superficie absorbadora del receptor. Estas pérdidas se representan por el factor de desbordamiento o *spillage*.

Por lo tanto, se define el rendimiento del heliostato como:

$$\eta_{heliostato} = \eta_{aa} \cdot \eta_{sb} \cdot \eta_r \cdot \eta_{fi} \quad (52)$$

Y volviendo a la ecuación 51, el factor  $\cos \theta$  se calcula de la siguiente manera:

$$\cos (2\theta) = \bar{t} \cdot \bar{s} \quad (53)$$

Definiendo  $\bar{t}$ , como el vector unitario que apunta al receptor desde el heliostato. Calculado como:

$$\bar{t} = \frac{(X_{torre} - X_{heliostato})\vec{i} + (Y_{torre} - Y_{heliostato})\vec{j} + (Z_{torre} - Z_{heliostato})\vec{k}}{\text{módulo del vector de arriba}} \quad (54)$$

Y  $\bar{s}$  se define según la siguiente expresión:

$$\bar{s} = (-\sin \phi \sin z)\vec{i} + (-\sin \phi \cos z)\vec{j} + (\cos \phi)\vec{k} \quad (55)$$

Obteniendo  $\phi$ , ángulo azimutal solar, a partir de las siguientes expresiones:

$$\phi = C_1 \cdot C_2 \cdot \phi' + 90 \cdot C_3 \cdot (1 - C_1 \cdot C_2) \quad (56)$$

Donde las constantes dependen del resto de los ángulos. Y se define  $\phi'$  como:



$$\phi' = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\sin \theta_z} \quad (57)$$

El ángulo  $\omega$ , se conoce como ángulo horario y se obtiene de la siguiente expresión:

$$\omega = 15 \cdot (h - 12) \quad (58)$$

Siendo  $h$  la hora solar en la que se realizan los cálculos. Volviendo a la fórmula 57, el ángulo  $\delta$  se denomina ángulo de declinación y se calcula de la siguiente manera:

$$\delta = 24,45 \cdot \sin(284 + N) \cdot \frac{360}{365} \quad (59)$$

Siendo  $N$  el día del año en el que se están realizando los cálculos.

Estos dos ángulos permiten calcular el cambio en la cantidad de radiación reflejada por heliostato durante el día y a lo largo del año ya que no es lo mismo concentrar radiación durante el mediodía de un día de verano que a las 5 de la tarde de un día de invierno. Y, para acabar de definir las variables de la ecuación 57, queda  $\theta_z$ , también denominada ángulo cenital, que responde a la siguiente igualdad:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \lambda + \cos \delta \cos \lambda \cos \omega \quad (60)$$

Calculando  $\lambda$ , como la latitud del lugar donde está ubicada la planta termosolar.

Y volviendo a la definición de  $\bar{s}$ , en la igualdad 55, definimos  $z$  como:

$$\sin z = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \phi} \quad (61)$$



Por lo tanto ya se puede calcular el ángulo  $\theta$  para cada heliostato, aunque nosotros utilizaremos un valor medio para todos los heliostatos, homogeneizando así el rendimiento de todos los heliostatos y, con ello, según la ecuación 51, se van añadiendo heliostatos hasta que se llega a cubrir la demanda de radiación del receptor.

Es conveniente dejar un poco de margen en el número de heliostatos a la hora del diseño del campo pues, cubierta con creces la demanda de radiación, siempre se pueden orientar los últimos heliostatos, que son los que peor rendimiento tienen hacia otros puntos, en otra dirección, dejando así de suministrar radiación al receptor.





## 4. RESULTADOS DEL DISEÑO

### 4.1 RESULTADOS DEL CICLO

Como ya se explicó en el apartado de teoría del ciclo de potencia, antes de empezar a realizar cálculos se necesita partir de una serie de datos que hay que concretar.

El primero es el tipo de ciclo de potencia a utilizar en la central. Por las razones que se explicaron en el capítulo anterior, se va a utilizar un ciclo Brayton con gas de trabajo calentado directamente por el sol, ya que esta configuración aprovecha mejor las altas temperaturas que pueden obtenerse en las centrales termosolares con receptor central. Debido a su abundancia, se elegirá aire como fluido de trabajo.

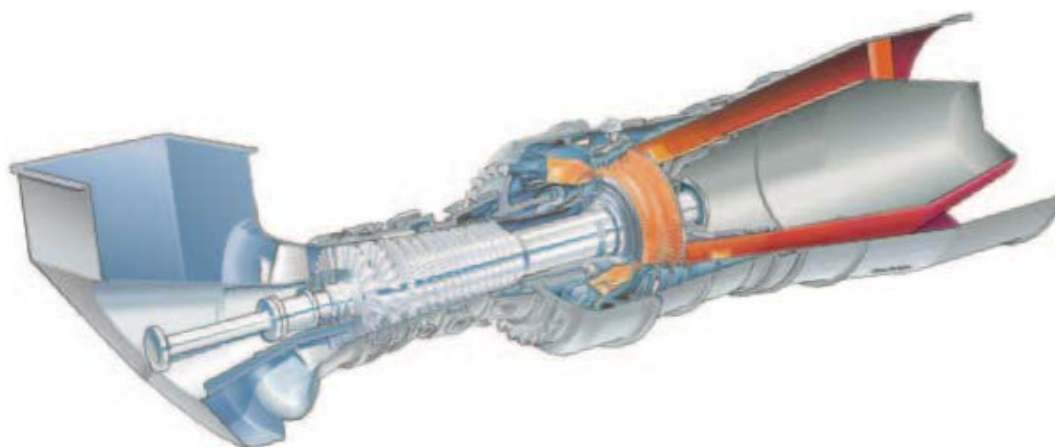
El siguiente aspecto a concretar, antes de comenzar a calcular nada, es la potencia que se desea obtener del ciclo. En el apartado teórico se analizaron las potencias que se obtienen normalmente de una planta de este tipo y también la máxima potencia que se ha logrado obtener en la planta más moderna que existe de este tipo. En este caso, se opta por una potencia algo superior a la media establecida pero que no se aleje mucho de este valor para poder contrastar nuestros resultados con los datos que se poseen de estas plantas. Por lo tanto, vamos a fijar 50 MW como valor a obtener de nuestro ciclo de potencia.

Una vez decidido el tipo de ciclo que se va a utilizar en nuestra planta y la potencia que se pretende obtener de él, se empieza a diseñar el ciclo de potencia.

Lo primero que se ha hecho ha sido estudiar los distintos modelos existentes en las mayores y más reputadas casas de fabricación de turbinas de gas industriales (en este caso han sido Siemens, General Electric y Mitsubishi). Tras revisar todos los modelos que se pueden ajustar a las características que se buscan,

que básicamente se reducen a que se ajuste a la potencia que se quiere obtener del ciclo y a la flexibilidad en las condiciones de operación y combustible, se ha seleccionado un modelo de la casa Siemens para acoplar a nuestra torre.

El modelo seleccionado ha sido la turbina de gas SGT-800 de la casa Siemens, ya que de ella se pueden extraer diferentes potencias según submodelos y condiciones de funcionamiento. Uno de los submodelos de esta turbina permite obtener 50,5 MW de potencia de ella, que es casi exactamente la potencia que se había fijado en un principio. La adaptación de esta turbina en la planta termosolar requiere el desmontaje de sus combustores y la instalación de acometidas que conduzcan el gas de salida de compresor hacia la torre y que devuelvan el gas de la torre a la entrada de la turbina de expansión. A continuación, se adjunta la ilustración 45, del modelo de turbina seleccionado:



**Ilustración 45: Turbina SGT-800 (Fuente: Siemens).**

En la información que ofrece el fabricante sobre las características de este modelo de turbina aparecen los siguientes datos útiles que servirán para realizar los cálculos posteriores y diseñar el ciclo de potencia:

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| <b>Potencia Neta</b>          | ISO 50.5 MW(e) |
| <b>Eficiencia eléctrica</b>   | 38.3%          |
| <b>Relación de compresión</b> | 21.1:1         |



|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| Flujo de gases de escape       | 134.2 kg/s |
| Temperatura de gases de escape | 553°C      |

Ilustración 46: Tabla de propiedades de la turbina SGT-800 (Fuente: Siemens).

Pero, para poder trabajar con las expresiones básicas de la termodinámica para turbinas y compresores que presentadas anteriormente, es necesario conocer los rendimientos isentrópicos de ambos componentes que, en este caso, no ofrece el fabricante. Por ello, se describirá, a continuación, el desarrollo matemático seguido para llegar a estos datos, los rendimientos isentrópicos de la turbina y el compresor, a partir de datos conocidos como son la potencia neta, la temperatura de entrada y salida de los gases y el ratio de compresión.

Partiendo de la potencia neta que se obtiene de la turbina de gas, que en este caso es:

$$W_{neto} = 50,5 \text{ MW}$$

Esta potencia neta es la diferencia de la potencia obtenida de la turbina, menos la potencia que consume el compresor, es decir:

$$W_{neto} = W_{turbina} - W_{compresor} \quad (62)$$

Se puede obtener la potencia de cualquier elemento con el flujo de aire,  $m_a$ , su calor específico,  $c_p$ , y la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida; todo ello relacionado según la siguiente fórmula:

$$W = m_a \cdot c_p \cdot (T_{entrada} - T_{salida}) \quad (63)$$

Por lo tanto, para la turbina y el compresor, se obtienen las siguientes expresiones:

$$W_{turbina} = m_a \cdot c_p \cdot (T_3 - T_4) \quad (64)$$



$$W_{compresor} = m_a \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (65)$$

Y, si se sustituyen las ecuaciones 64 y 65 en la expresión 62, se obtendrá:

$$W_{neto} = \eta_{total} \cdot m_a \cdot c_p [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)] \quad (66)$$

Sacando factor común a las temperaturas conocidas, es decir, la temperatura de entrada,  $T_1$ , y la temperatura de salida de los gases,  $T_4$ , proporcionadas por el fabricante en la hoja de características de nuestra turbina, se obtiene:

$$W_{neto} = \eta_{total} \cdot m_a \cdot c_p \left[ T_4 \cdot \left( \frac{T_3}{T_4} - 1 \right) - T_1 \cdot \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right] \quad (67)$$

Por lo tanto, lo único que no se conoce de esta expresión son las relaciones  $\frac{T_3}{T_4}$  y  $\frac{T_2}{T_1}$ . Pero estos datos se pueden obtener mediante los rendimientos isentrópicos de la turbina y el compresor, respectivamente, y de la relación de compresión,  $r_p$ , que también aparece en la hoja de características.

Primero, se obtiene la relación  $\frac{T_2}{T_1}$ , por lo que empezaremos con el compresor. Partiendo de la ecuación del rendimiento isentrópico del compresor:

$$\eta_{sc} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (68)$$

Se despeja la temperatura desconocida, es decir  $T_2$ , en función del resto de parámetros:

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{sc}} \quad (69)$$



Y, a continuación, se extrae la temperatura de entrada,  $T_1$ , como factor común en la parte derecha de la expresión:

$$T_2 = T_1 \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{T_{2s}}{T_1} - 1}{\eta_{sc}} \right] \quad (70)$$

Se desconoce la temperatura ideal de salida del compresor, es decir,  $T_{2s}$ , pero se puede relacionar con la relación de compresión mediante la siguiente expresión para un gas ideal caloríficamente perfecto que realiza un proceso isentrópico:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (71)$$

Siendo  $\gamma$  el coeficiente de dilatación adiabático, es decir, la relación entre el calor específico del gas,  $c_p$ , y la capacidad calorífica a volumen constante,  $c_v$ . Relacionándose de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (72)$$

Y se sabe también que:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad (73)$$

Por lo tanto, sustituyendo la ecuación 71 en la 70, obtenemos la siguiente relación:



$$T_2 = T_1 \cdot \left[ 1 + \frac{\left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1}{\eta_{sc}} \right] \quad (74)$$

Y si aplicando la igualdad número 73, se obtiene:

$$T_2 = T_1 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\eta_{sc}} \cdot \left\{ \left( \frac{1}{r_p} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1 \right\} \right] \quad (75)$$

Si ahora se pasa la temperatura de entrada,  $T_1$ , al otro lado de la igualdad aparece ya la relación que se estaba buscando:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left[ 1 + \frac{1}{\eta_{sc}} \cdot \left\{ \left( \frac{1}{r_p} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1 \right\} \right] \quad (76)$$

Se hace exactamente lo mismo para conseguir la relación  $\frac{T_3}{T_4}$ , solo que esta vez hay que hacerlo con la turbina. Partiendo del cálculo del rendimiento isentrópico de la turbina:

$$\eta_{st} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \quad (77)$$

En este caso, se despeja la temperatura de salida, es decir,  $T_4$ , de la expresión anterior, obteniendo:

$$T_4 = T_3 - \eta_{st} \cdot (T_3 - T_{4s}) \quad (78)$$

Y se saca factor común a la temperatura de entrada a la turbina,  $T_3$ , a la parte derecha de la igualdad:



$$T_4 = T_3 \cdot \left[ 1 - \eta_{st} \cdot \left( 1 - \frac{T_{4s}}{T_3} \right) \right] \quad (79)$$

Se transforma la relación de temperaturas ideales, que es desconocida, con las presiones, mediante la siguiente expresión:

$$\frac{T_{4s}}{T_3} = \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (80)$$

Y sabiendo que la relación de presiones en la turbina (igual o muy similar a la del compresor por simetría del conjunto):

$$\frac{P_3}{P_4} = r_p \quad (81)$$

Sustituyendo la relación 81 en 80 y, lo obtenido, se mete en la fórmula 79, obteniendo:

$$T_4 = T_3 \cdot \left[ 1 - \eta_{st} \cdot \left( 1 - r_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \right] \quad (82)$$

Como la relación que se desea obtener es  $\frac{T_3}{T_4}$ , hay que despejar esta relación de la formula anterior y obtenemos:

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{1}{\left[ 1 - \eta_{st} \cdot \left( 1 - r_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \right]} \quad (83)$$

Por lo que si, finalmente, se cambian las ecuaciones 83 y 76 en la fórmula número 67, resulta la siguiente función:



$$W_{neto} = \eta_{generador\_eléctrico} \cdot m_a \cdot c_p \left[ T_4 \cdot \left( \frac{1}{\left[ 1 - \eta_{st} \cdot \left( 1 - r_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \right]} - 1 \right) - T_1 \cdot \left( \frac{1}{\eta_{sc}} \cdot \left\{ \left( \frac{1}{r_p} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - 1 \right\} \right) \right] \quad (84)$$

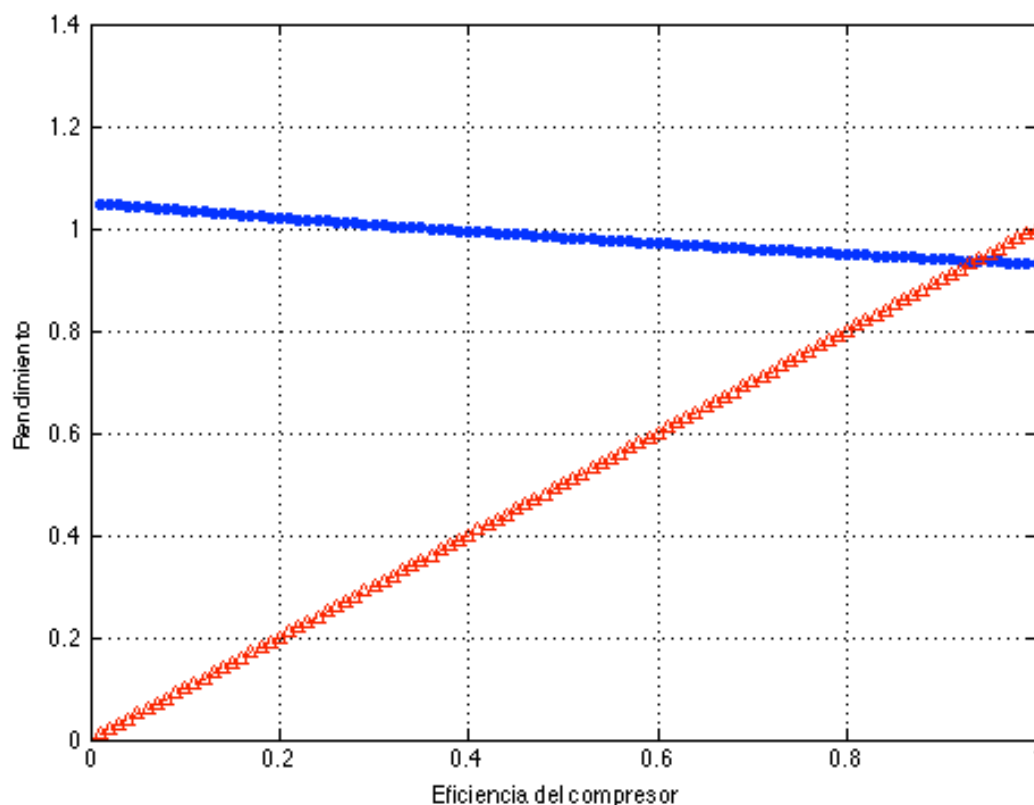
De esta función solo se desconocen, de todos los parámetros que se utilizan, los rendimientos isentrópicos de la turbina y del compresor; el resto son valores conocidos. Por consiguiente, a partir de la potencia neta, gasto másico de aire, y temperaturas de entrada y salida de la turbina de gas descritas en la tabla de la ilustración 46, es posible calcular el rendimiento de la isentropico de la turbina de expansión de gases calientes como función del rendimiento de compresión de los gases frescos. Este es el procedimiento de cálculo que se seguirá para estimar los rendimientos isentrópicos de turbina y compresor de la turbina de gas SGT-800 que se ha seleccionado.

Para realizar todos estos cálculos y llevarlos a cabo con precisión, ya que las propiedades del aire van variando con la temperatura, se ha precisado de la ayuda del software MATLAB ® con el cual se ha realizado un script de cálculo que se adjuntará en el Apéndice 1.

Cabe destacar, que tanto en este código como en el resto que se han utilizado en este trabajo, todas las propiedades han sido calculadas mediante el script de MATLAB ® denominado AirProp, que es capaz de calcular las propiedades del aire en función de las temperaturas.

Una vez ejecutado el código, el programa devuelve los siguientes resultados:





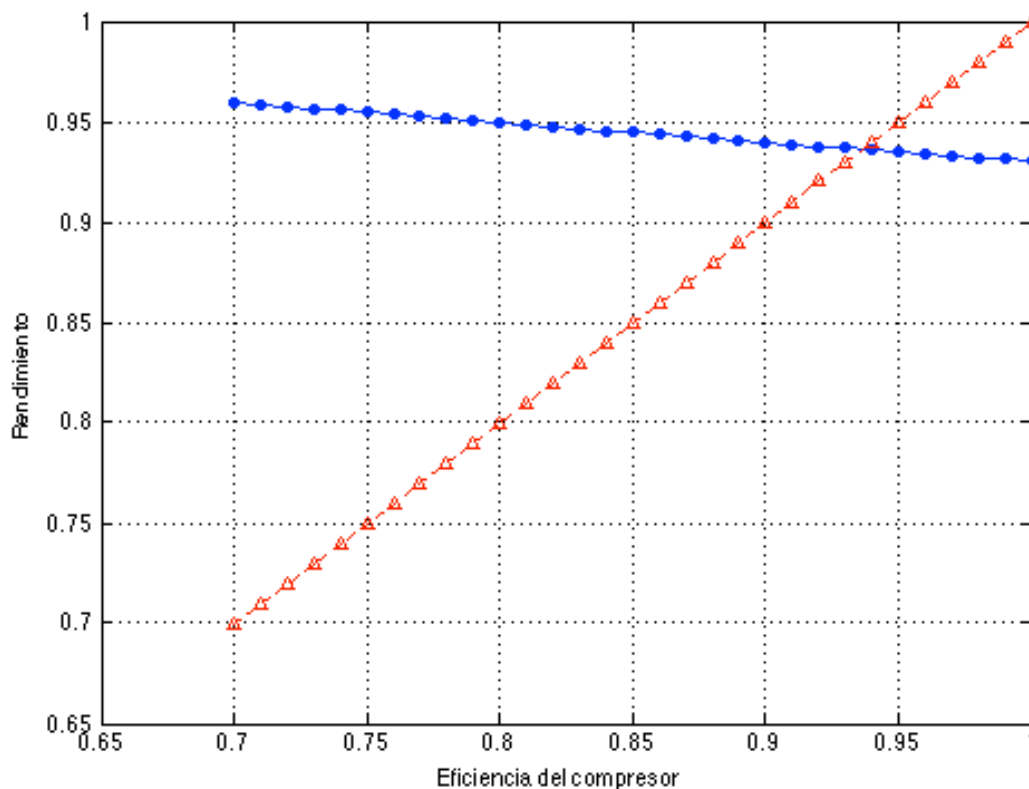
**Ilustración 47: Evolución del rendimiento de la turbina con respecto al rendimiento del compresor**  
(Fuente: Propia).

Esta gráfica, ilustración 47, muestra la evolución del rendimiento de la turbina (línea azul) según se aumentando el rendimiento del compresor (línea roja). El programa devuelve esta solución y no un par de valores, porque como se dijo anteriormente, en la ecuación 83 se desconocen ambos rendimientos. Por ello, se ha optado por darle todos los valores posibles al rendimiento del compresor, es decir, de un 0 a un 100%, y ver cómo se comportaba la turbina.

Según la gráfica, el rendimiento de la turbina varía desde un 104,83%, cuando el rendimiento del compresor es un 0%, hasta un 93,03%, cuando el compresor funciona idealmente, es decir, con un rendimiento del 100%. Por lo tanto, los valores del rendimiento del compresor menores de un 30% dan lugar a un rendimiento de la turbina imposible, pues es mayor que el 100% (ideal).

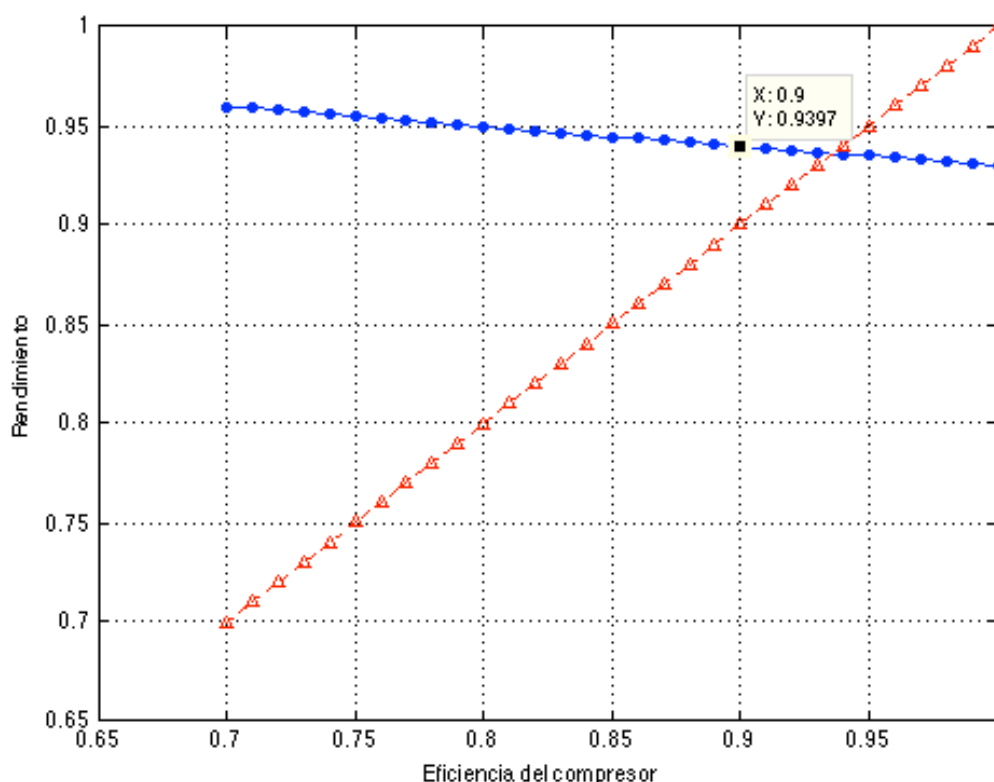
Pero como el rendimiento de la turbina varía con una pendiente tan pequeña comparada con la pendiente del rendimiento del compresor se ha decidido

limitar el rendimiento del compresor entre un 70% y un 100% para poder observar mejor el comportamiento del rendimiento de la turbina. En este segundo caso, se obtuvo la siguiente gráfica, ilustración 48:



**Ilustración 48: Evolución del rendimiento de la turbina con respecto al rendimiento del compresor (Fuente: Propia).**

En este rango de valores, ya sea para el compresor (entre 70 y 100%) o para la turbina (entre 93,03 y 95,98%), se agrupan en los valores de trabajo habituales para estos componentes. Por lo tanto, estudiando la gráfica y atendiendo a los rendimientos actuales de este tipo de componentes, se llega a la conclusión de que el rendimiento isentrópico de la turbina siempre tiene que ser algo mayor que el del compresor para alcanzar el rendimiento global del ciclo de la turbina de gas seleccionada. Esto es así salvo que el rendimiento del compresor sea muy alto, lo cual no suele ser habitual. Finalmente, se ha decidido escoger un valor convencional del 90% para el rendimiento isentrópico del compresor y con este rendimiento se ha obtenido el rendimiento isentrópico de la turbina. En la ilustración 49, se pueden observar esta pareja de valores:



**Ilustración 49: Valores del rendimiento isentrópico de la turbina y del compresor seleccionados (Fuente: propia).**

Como el valor que se obtiene para el rendimiento isentrópico de la turbina despejando de la ecuación 84 es de un 93,97%, el resultado resulta satisfactorio pues es un rendimiento isentrópico realista para este tipo de turbinas. Por ello para el presente trabajo se utilizarán los valores recogidos en la ilustración 50.

|  |        |
|--|--------|
| <b>Rendimiento isentrópico de la turbina</b> | 93,97% |
| <b>Rendimiento isentrópico del compresor</b> | 90%    |

**Ilustración 50: Rendimientos isentrópicos de la turbina y del compresor (Fuente: Propia).**

Ya se tienen todos los datos necesarios para empezar a simular y diseñar el ciclo de potencia, según se ha descrito en el apartado teórico del ciclo.



#### 4.1.1 El compresor

Para empezar a calcular el ciclo, es necesario conocer las propiedades del aire. En el presente caso, se ha decidido dimensionar nuestra planta para un día de verano, ya que será cuando la planta se verá más exigida debido al aumento de la radiación que llega en esos días y a las altas temperaturas; Además tiene que cumplir la condición de que fuese un día claro (sin precipitaciones y con cielos despejados), por lo que, finalmente, se ha escogido el 10 de julio. El lugar seleccionado para el emplazamiento de la planta termosolar es Sevilla, ya que es uno de los lugares con más horas de Sol anuales en toda España. Estas eran las propiedades del aire para ese día en Sevilla el año pasado:

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| <b>Temperatura [K]</b>          | 312,1   |
| <b>Presión [Pa]</b>             | 101.420 |
| <b>Velocidad del aire [m/s]</b> | 9       |

Ilustración 51: Propiedades del aire el 10 de Julio en Sevilla (Fuente: eltiempo24.es).

Calculando el diámetro del tubo colector de entrada al ciclo, utilizado para recoger el aire de la atmosfera, según la educación 2, y con las propiedades determinadas en la ilustración 51, se obtiene el siguiente resultado:

|  |      |
|--|------|
| <b>Diámetro del tubo de admisión de aire [m]</b> | 4,01 |
|--|------|

Ilustración 52: Diámetro del tubo de admisión (Fuente: Propia).

Al ser necesario introducir este aire en el compresor que, en este caso, trabaja con aire a 100m/s, hay que adecuar esta velocidad mediante un estrechamiento del tubo. Por lo tanto, mediante la misma ecuación que para el diámetro anterior, se calculará ahora el diámetro de admisión del compresor, obteniendo:

|   |      |
|---|------|
| <b>Diámetro de admisión del compresor [m]</b> | 1,23 |
|---|------|

Ilustración 53: Diámetro para introducir el aire en el compresor (Fuente: Propia).



Según el principio de Bernuilli, con pérdidas, teniendo en cuenta el filtro y la contracción —como está explicado en la ecuación 4—, obtenemos las siguientes propiedades del aire justo antes de entrar al compresor:

|  |        |
|--|--------|
| <b>Presión de entrada al compresor [Pa]</b>    | 93.189 |
| <b>Temperatura de entrada al compresor [K]</b> | 312,2  |

Ilustración 54: Propiedades de entrada al compresor (Fuente: Propia).

Por lo tanto, debido a sus componentes, la zona de entrada al compresor provoca una pérdida de carga de:

|   |         |
|---|---------|
| <b><math>\Delta P_{\text{entrada al compresor}}</math> [Pa]</b> | 8.231,2 |
|---|---------|

Ilustración 55: Perdida de carga en la entrada del compresor (Fuente: Propia).

Para calcular las propiedades del aire a la salida del compresor se utilizan las ecuaciones 6 y 8, obteniendo como resultado:

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Presión a la salida del compresor [Pa]</b>    | 1.966.300 |
| <b>Temperatura a la salida del compresor [K]</b> | 772,79    |

Ilustración 56: Propiedades a la salida del compresor (Fuente: Propia).

A la salida del compresor hay que devolverle al fluido una velocidad que no cause unas pérdidas de carga demasiado grandes por lo que se ha establecido la velocidad del fluido térmico en los tubos en 10m/s. Estos tubos estarán fabricados con acero, que tienen una rugosidad de:

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| <b>Rugosidad acero [mm]</b> | 0,0024 |
|-----------------------------|--------|

Ilustración 57: Rugosidad del acero (Fuente: siafa.com).

Volviendo con estos datos a la expresión 14, se obtienen las propiedades de entrada al receptor:

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Presión de entrada al receptor [Pa]</b>    | 1.962.200 |
| <b>Temperatura de entrada al receptor [K]</b> | 772,79    |

Ilustración 58: Propiedades de entrada al receptor (Fuente: Propia).

Por consiguiente se ha producido una pérdida de carga desde el compresor hasta el receptor de:

|  |         |
|--|---------|
| <b><math>\Delta P_{del\ compresor\ al\ receptor}</math> [Pa]</b> | 4.110,2 |
|--|---------|

Ilustración 59: Pérdida de carga del compresor al receptor (Fuente: Propia).

#### 4.1.2 El receptor

Antes de iniciar el diseño de cualquier parte del ciclo se decidió que el receptor iba a ser volumétrico de tipo material poroso. Por ello, es necesario elegir el tipo de material poroso del receptor. Comparado los resultados que se obtendrían si se fabricaba el receptor de un material poroso cerámico, como es la espuma de carburo de silicio (SiC), o de uno metálico, como es la espuma de aluminio. Ambos materiales se pueden observar en la ilustración 60:

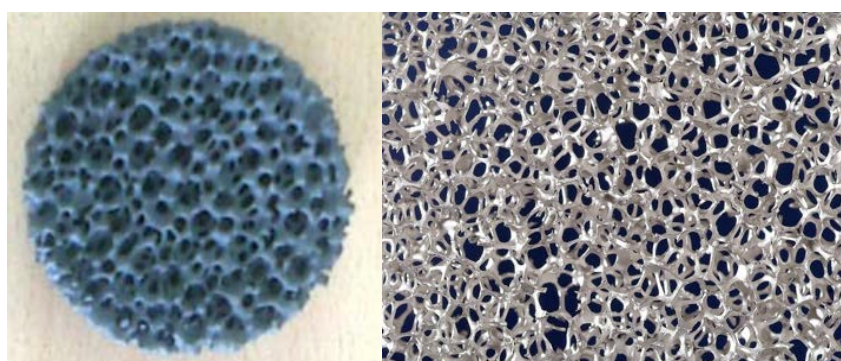


Ilustración 60: Espuma de carburo de silicio, y espuma de aluminio (Fuente Applied Thermal Engineering 31, Villafán-Vidales)

En la siguiente tabla se recogen las propiedades geométricas, de porosidad y diámetro de poro, de ambos materiales:



|                                | Carburo de Silicio | Aluminio |
|--------------------------------|--------------------|----------|
| Porosidad ( $\epsilon$ ) [%]   | 75                 | 95       |
| Diámetro de poro ( $d_p$ ) [m] | 0,0025             | 0,00059  |

Ilustración 61: Propiedades de los materiales porosos (Fuente: Propia).

Utilizando la fórmula 16, aparece la caída de presión debido al receptor que se recoge en la siguiente tabla en función del material utilizado.

|                            | Carburo de Silicio | Aluminio |
|----------------------------|--------------------|----------|
| $\Delta P_{receptor}$ [Pa] | 81.126             | 16.927   |

Ilustración 62: Perdida de carga del receptor (Fuente: Propia).

Como se puede apreciar, la pérdida de carga producida por el material poroso metálico es mucho menor que la producida por el cerámico. El aluminio ofrecería mejores resultados en el receptor si no se necesitaran temperaturas tan altas, ya que el punto de fusión del aluminio se alcanzan 933 K. Por ello es imposible utilizar este tipo de materiales debido a la limitación de la temperatura y, aunque se produzcan mayores pérdidas de carga, se utilizará el carburo de silicio en el receptor.

Una vez seleccionado el material del que está hecho el receptor, (el material cerámico en este caso), la presión que se obtiene a la salida del receptor es la siguiente:

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| Presión a la salida del receptor [Pa] | 1.881.074 |
|---------------------------------------|-----------|

Ilustración 63: Presión a la salida del receptor (Fuente: Propia).

#### 4.1.3 La turbina

Antes de entrar a la turbina, el fluido térmico debe bajar desde el receptor hasta esta, recorriendo el camino que se describe en el apartado de teoría. Si se



utiliza la fórmula 17 para calcular la pérdida de carga que hay al recorrer este camino y al haber adaptado la velocidad del fluido a la velocidad de trabajo de la turbina, establecida en 120m/s, se obtiene que la presión a la entrada de la turbina es:

|   |                  |
|---|------------------|
| <b>Presión de entrada a la turbina [Pa]</b> | <b>1.863.000</b> |
|---|------------------|

**Ilustración 64: Presión de entrada a la turbina (Fuente: Propia).**

En consecuencia, en el recorrido que traza el fluido desde el receptor hasta la turbina hay una pérdida de carga de:

|   |               |
|---|---------------|
| <b><math>\Delta P_{del\ receptor\ a\ la\ turbina}</math> [Pa]</b> | <b>18.039</b> |
|---|---------------|

**Ilustración 65: Perdida de carga del receptor hasta la turbina (Fuente: Propia).**

Como se dijo anteriormente en el apartado de teoría, se supone que la presión de salida de la turbina es igual a la presión atmosférica y se calcula la temperatura a la entrada de la turbina mediante la ecuación 21, obteniendo:

|   |               |
|---|---------------|
| <b>Temperatura a la entrada de la turbina [K]</b> | <b>1425,6</b> |
|---|---------------|

**Ilustración 66: Temperatura a la entrada de la turbina (Fuente: Propia).**

Mediante la igualdad número 74, se puede obtener el valor numérico de la temperatura a la salida de la turbina, que es:

|  |               |
|--|---------------|
| <b>Temperatura a la salida de la turbina [K]</b> | <b>683,82</b> |
|--|---------------|

**Ilustración 67: Temperatura a la salida de la turbina (Fuente: Propia).**

Con todos estos datos, utilizando la igualdad 21, se calculará la presión real de salida de la turbina:

|   |                |
|---|----------------|
| <b>Presión a la salida de la turbina [Pa]</b> | <b>101.330</b> |
|---|----------------|

**Ilustración 68: Presión a la salida de la turbina (Fuente: Propia).**



Para finalizar los cálculos y simulación del ciclo de potencia de la planta termosolar, ya solo queda calcular las pérdidas de carga que conlleva expulsar los gases de salida de la turbina a través de la chimenea.

Aplicando la fórmula 24, que introduce la pérdida de carga producida desde la salida de la turbina hasta que el aire es expulsado por la chimenea, se obtiene una presión de salida de la chimenea:

|                                 |                |
|---------------------------------|----------------|
| <b>Presión a la salida [Pa]</b> | <b>100.880</b> |
|---------------------------------|----------------|

Ilustración 69: Presión de salida de los gases (Fuente: Propia).

Esta presión es ligeramente inferior a la ambiente, pero dado que el aire posee una energía cinética residual a la salida, puede usarse parte de esa energía en un difusor previo para así aumentar un 0,3% la presión hasta igualarla a la del ambiente. Estos detalles de acabado final no se considerarán en el diseño preliminar del presente trabajo. En la imagen 70, se muestra un diagrama Ts del aire en el que se ha representado el ciclo completo:

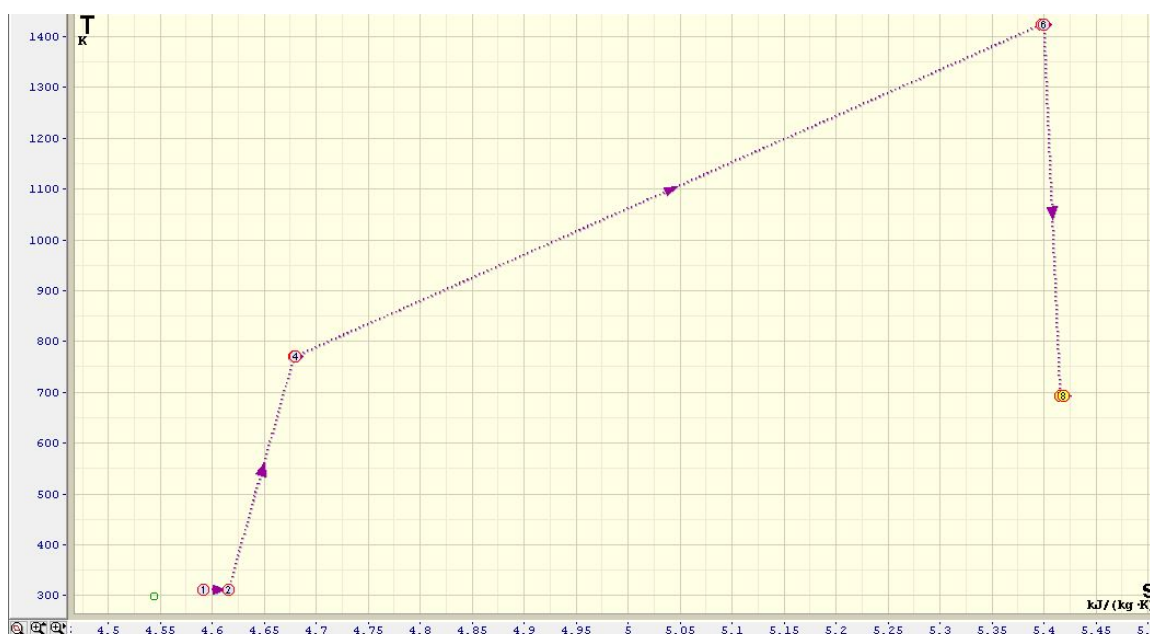


Ilustración 70: Diagrama T-s del ciclo de potencia (Fuente: Propia).



## 4.2 RESULTADOS DEL RECEPTOR

Como ya se dijo en el apartado del diseño del ciclo de potencia, en el que se estudiaba parte de este elemento del ciclo, el receptor es volumétrico fabricado con material cerámico poroso. Más concretamente, espuma de carburo de silicio, (SiC), que tiene las propiedades que se presentan en la ilustración 50, colocada en el capítulo de resultados del ciclo.

En el apartado de teoría se explica que se debe partir del dato del calor que para calentar el aire hasta la temperatura calculada en el apartado del ciclo y, con ello, se obtiene el calor total que es necesario transmitir a través del receptor. En este caso, si se sustituye en la fórmula 25, se obtiene:

|  |               |
|--|---------------|
| <b>Calor que necesitamos transmitir al fluido [MW]</b> | <b>101,33</b> |
|--|---------------|

Ilustración 71: Calor que se necesita transmitir al fluido (Fuente: Propia).

Por lo tanto, ahora es necesario calcular el coeficiente de transferencia de calor debido a la convección del flujo de gas a través del material poroso y, con ello, calcular las medidas que necesarias para el receptor.

Según los números de Reynolds y Prandtl para la convección, aparecen los siguientes valores:

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| <b><math>Re_{convección}</math></b> | <b>47,82</b> |
| <b><math>Pr_{convección}</math></b> | <b>0,70</b>  |

Ilustración 72: Números de Reynolds y Prandtl para la convección (Fuente: Propia).

E introduciendo estos valores en la fórmula 26, para calcular el número de Nusselt, resulta:



|                   |      |
|-------------------|------|
| $Nu_{convección}$ | 3,13 |
|-------------------|------|

Ilustración 73: Número de Nusselt para la convección (Fuente: Propia).

Mediante la fórmula 27, se calcula el coeficiente de transferencia de calor debido a la convección a través de un material poroso, obteniendo:

|   |        |
|---|--------|
| $h_{convección} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ | 469,62 |
|---|--------|

Ilustración 74: Coeficiente de transferencia de calor debido a la convección (Fuente: Propia).

Y aplicando la expresión número 31, se obtiene que el calor por unidad de volumen transmitido por convección a través del material poroso al fluido térmico es:

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| $q \left[ \frac{kW}{m^3} \right]$ | 14,68 |
|-----------------------------------|-------|

Ilustración 75: Calor por unidad de volumen transferido por convección al fluido (Fuente: Propia).

Si se calcula, mediante la igualdad 33, el volumen que se necesita que tenga el receptor para transmitir la cantidad de calor adecuada, se obtiene:

|           |        |
|-----------|--------|
| $V [m^3]$ | 660,25 |
|-----------|--------|

Ilustración 76: Volumen necesario del receptor (Fuente: Propia).

Obtenemos los siguientes valores para el diámetro y la altura del receptor si aplicamos las expresiones 34 y 35:

|       |      |
|-------|------|
| H [m] | 9,44 |
| D [m] | 4,72 |

Ilustración 77: Dimensiones del receptor (Fuente: Propia).

A continuación hay que calcular la temperatura del receptor para, posteriormente, ver cuánto calor pierde hacia el ambiente. Se supondrá esta



temperatura uniforme a lo largo de todo el receptor. Esta hipótesis considera que los gradientes térmicos dentro del material poroso son despreciables frente a los gradientes térmicos desde la superficie del receptor hacia fuera. Esto es debido a que se puede considerar que las posibles pérdidas que puedan enfriar el receptor son mucho menores que el calor absorbido por el receptor para mantener su temperatura. No obstante se trata de una aproximación, y en la realidad la temperatura de la superficie más exterior del receptor puede descender ligeramente como consecuencia de las pérdidas de calor hacia el exterior. También pueden ocurrir gradientes de temperatura en el interior del receptor debido a la captación de calor por parte del gas. Sin embargo, dado que el calor específico del gas es muy reducido estos gradientes internos se supondrán en primera aproximación despreciables. Por lo que utilizando la expresión 36, se obtiene una temperatura del receptor de:

|                    |        |
|--------------------|--------|
| $T_{receptor} [K]$ | 1406,6 |
|--------------------|--------|

Ilustración 78: Volumen necesario del receptor (Fuente: Propia).

Y en la ilustración 79 se puede observar cómo se va calentando el fluido térmico, es decir aire, según va avanzando a través del receptor:

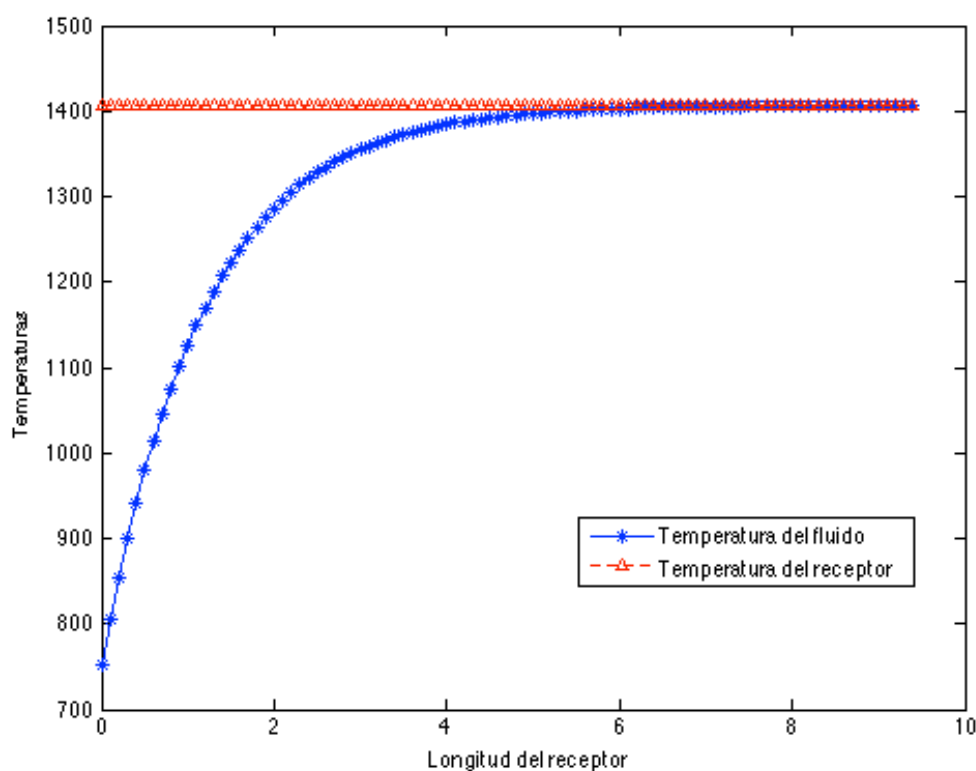


Ilustración 79: Desarrollo de la temperatura del fluido térmico dentro del receptor (Fuente: Propia).

Como ya se conoce el funcionamiento interno del receptor vamos a colocarle la cubierta metálica al receptor. Conocido el flujo de calor por conducción que existe en el receptor, si aplicamos la ecuación de conducción con un flujo constante conocido:

$$q_s'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (85)$$

La cubierta que se coloca es de 5mm de espesor debido a las siguientes razones:

- La presión de trabajo no es muy alta.
- Aunque el diámetro del receptor es alto (lo que haría que la integral de presión fuese altísima), normalmente se encapsulan partes de material poroso, cada una con su recubrimiento, con lo que la integral de presión sobre un solo recubrimiento es menor.



- El recubrimiento puede adherirse o fijarse al material poroso con pernos que lo atraviesen radialmente y que ayuden a compensar la fuerza de distensión que la presión interior del gas genera sobre la cubierta.

Por lo que conocidos estos datos somos capaces de obtener la diferencia de temperaturas entre la parte exterior de la cubierta y la temperatura del material poroso, obteniendo la siguiente diferencia:

|            |      |
|------------|------|
| $\Delta T$ | 4,43 |
|------------|------|

Ilustración 80: Diferencia de temperaturas entre la cubierta y el material poroso (Fuente: Propia).

Por lo que la temperatura exterior de nuestro receptor será:

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| $T_{\text{exterior del receptor}}$ | 1411 |
|------------------------------------|------|

Ilustración 81: Temperatura exterior del receptor (Fuente: Propia).

Una vez conocidas las dimensiones reales del receptor y su temperatura, ya se pueden comenzar a calcular las pérdidas por convección y radiación con el ambiente.

Primero, se empieza calculando las pérdidas por convección y, como se explicó en el capítulo de teoría, hay que comprobar qué tipo de convección hay, para utilizar las correlaciones adecuadas. Para ello, se calcula el número de Reynolds y el número de Grashof para la convección, según las formulas 38y 37, y aparecen los siguientes resultados:

|                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| $Re_{\text{convección}}$  | 4.983.300             |
| $Gra_{\text{convección}}$ | $1,04 \times 10^{14}$ |

Ilustración 82: Números de Reynolds y Grashof para la convección (Fuente: Propia).

Comparadas según la ilustración33, aparece la siguiente relación:



|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| $Gr_{convección} / Re_{convección}^2$ | 4,2 |
|---------------------------------------|-----|

Ilustración 83: Comparación del Grashof con el Reynolds (Fuente: Propia).

Como el resultado es mayor que 1, se entraría en la convección libre, por lo que se podrán utilizar las expresiones explicadas en el apartado de teoría.

Aplicando la correlación de Churchill y Chu, expresión 39, se obtiene el siguiente Nusselt de convección:

|                   |         |
|-------------------|---------|
| $Nu_{convección}$ | 4.744,4 |
|-------------------|---------|

Ilustración 84: Número de Nusselt para la convección (Fuente: Propia).

Por lo que el coeficiente de transferencia de calor del receptor con el ambiente tiene el siguiente valor, aplicando la ecuación 27:

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| $h_{convección} [W / m^2 \cdot K]$ | 13,31 |
|------------------------------------|-------|

Ilustración 85: Coeficiente de transferencia de calor debido a la convección (Fuente: Propia).

Introduciendo todos los datos calculados y las temperaturas que se tomaron como punto inicial en el cálculo del ciclo, en la expresión 42, se obtiene que el calor perdido por convección es:

|                       |      |
|-----------------------|------|
| $Q_{convección} [MW]$ | 2,05 |
|-----------------------|------|

Ilustración 86: Calor perdido por convección (Fuente: Propia).

A continuación, hay que conocer las pérdidas por radiación con el ambiente. Y aplicando las expresiones 44 y 45, se obtiene directamente el valor de la cantidad de calor perdido debido a la radiación:

|                      |       |
|----------------------|-------|
| $Q_{radiación} [MW]$ | 18,62 |
|----------------------|-------|

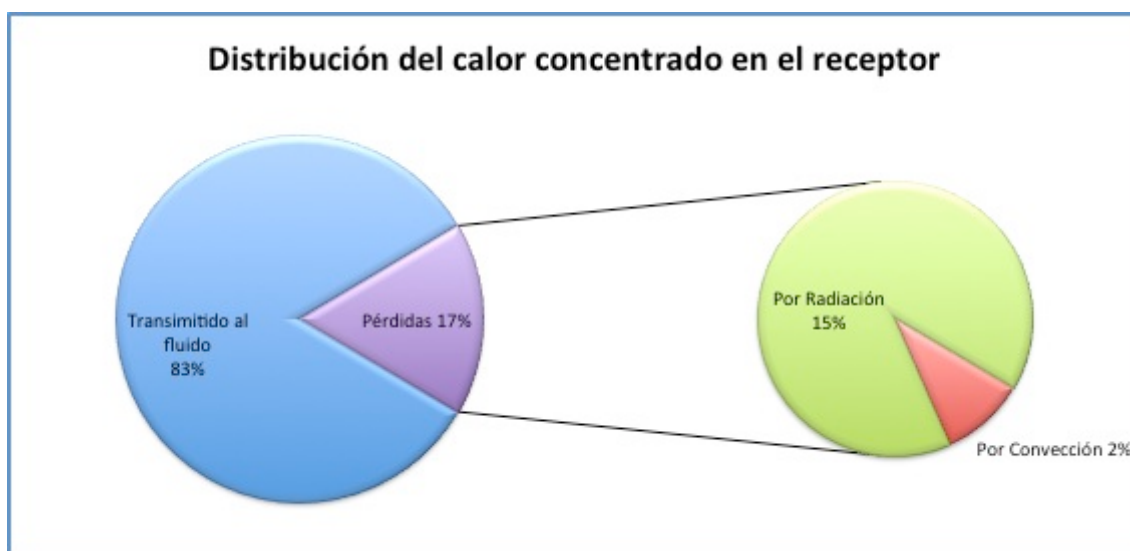
**Ilustración 87: Calor perdido por radiación (Fuente: Propia).**

Sumando las pérdidas que se tienen al calor necesitado para calentar el agua, obtendremos el valor de la radiación que se debe concentrar en el receptor para el correcto funcionamiento del ciclo. Así, aplicando la expresión 42, se obtiene:

|                  |       |
|------------------|-------|
| $Q_{total}$ [MW] | 122,0 |
|------------------|-------|

**Ilustración 88: Calor total que necesito en el receptor (Fuente: Propia).**

La imagen 89 resume cómo se distribuye todo el calor concentrado sobre el receptor entre pérdidas por convección, radiación y el calor que se le transmite al fluido térmico, que es el que finalmente se utiliza para producir electricidad.



**Ilustración 89: Distribución del calor concentrado en el receptor (Fuente: Propia).**

En esta ilustración se aprecia que se pierde un 17% del calor concentrado en el receptor debido a la radiación y a la convección. Y, de este 17% de pérdidas, el 89% de ellas se producen debido a la radiación y solo un 11% es debido a la convección.

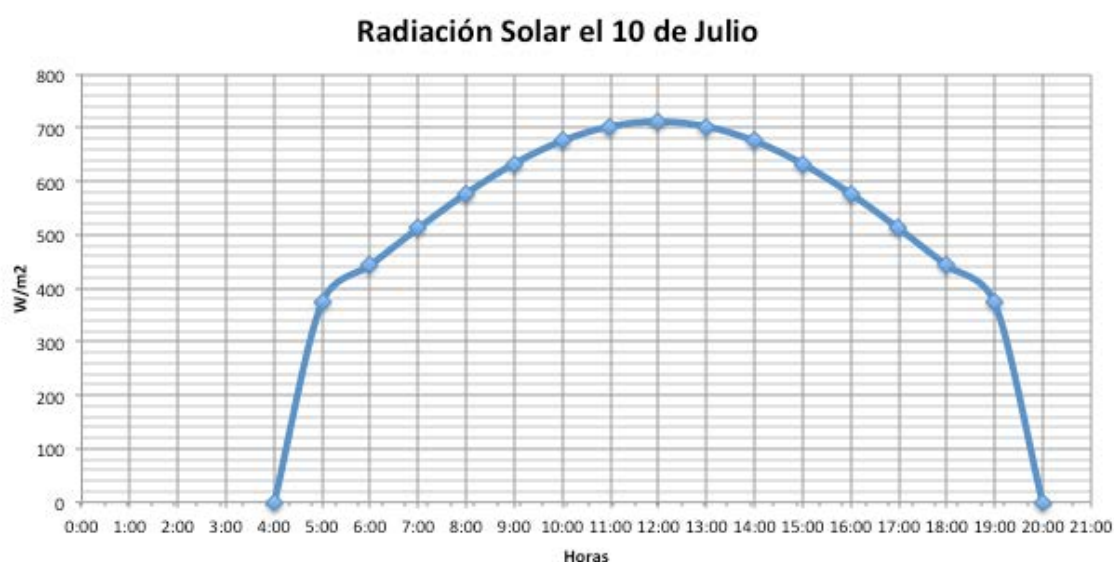




Por lo tanto, comprobamos que las pérdidas de calor más importantes trabajando con temperaturas tan altas, unos 1400 K, son las pérdidas producidas debido a la radiación, ya que suponen casi un 90% de las pérdidas totales del receptor.

## 4.3 RESULTADOS DEL CAMPO DE HELIOSTATOS

Como se explicó anteriormente, el presente trabajo realiza el diseño de la planta termosolar para emplazarla en Sevilla y comprobar su funcionamiento para un día de verano, más en concreto el 10 de julio. Para realizar los cálculos del campo se ha de conocer el dato de la radiación solar que llega por superficie a nuestra localización por lo que, se obtiene el siguiente gráfico, ilustración 90, para dicha fecha del 10 de julio de los datos de la Agencia Andaluza de Energía.



**Ilustración 90: Radiación directa el 10 de Julio (Fuente: Agencia Andaluza de Energía).**

Para el mediodía, que es el momento elegido para el diseño, aparecen los datos siguientes:

|   |              |
|---|--------------|
| <b><i>Radiación</i><sub>directa</sub> [W/m<sup>2</sup>]</b> | <b>711,7</b> |
|---|--------------|

**Ilustración 91: Radiación directa a mediodía (Fuente: Propia).**

Una vez que se dispone de este dato ya solo queda conocer el rendimiento del receptor,  $\eta_{helio\,stato}$ , para comenzar con los cálculos.



Según se vio en el apartado de teoría, el rendimiento general del receptor viene definido por varios rendimientos, como se explica en la ecuación 52. En el caso presente, se tomarán como esos rendimientos los siguientes valores:

| Rendimiento | Valor [%] |
|-------------|-----------|
| $\eta_{aa}$ | 95        |
| $\eta_{sb}$ | 95        |
| $\eta_r$    | 90        |
| $\eta_{fi}$ | 90        |

Ilustración 92: Valores de los rendimientos (Fuente: Propia).

Por lo tanto, según la igualdad 52, el rendimiento del receptor será:

|                          |      |
|--------------------------|------|
| $\eta_{heliostato} [\%]$ | 73,1 |
|--------------------------|------|

Ilustración 93: Rendimiento del receptor (Fuente: Propia).

Volviendo a la ecuación 51, solo queda por conocer el área de los heliostatos (se va a utilizar el mismo tipo de heliostato que los instalados en la planta Gemasolar) cuya dimensión es la siguiente:

|                        |     |
|------------------------|-----|
| $A_{heliostato} [m^2]$ | 120 |
|------------------------|-----|

Ilustración 94: Área del receptor (Fuente: Propia).

Y una vez conocidos estos datos, ya se puede empezar con los cálculos y el diseño del campo de heliostatos. Para realizar los cálculos explicados en el apartado de teoría se ha implementado un código en MATLAB®, que se adjunta en el apéndice 4. Una vez ejecutado este código, se obtiene que se necesitan 29 anillos de heliostatos, el último de ellos incompleto debido a que se sobrepasaba en gran medida la demanda de radiación. Se obtiene la siguiente distribución del campo de heliostatos:



| Anillo | Distancia a la torre [m] | Nº de heliostatos |
|--------|--------------------------|-------------------|
| 1      | 70.00                    | 26                |
| 2      | 84.79                    | 31                |
| 3      | 100.12                   | 35                |
| 4      | 116.01                   | 40                |
| 5      | 132.44                   | 44                |
| 6      | 149.42                   | 48                |
| 7      | 166.95                   | 52                |
| 8      | 185.02                   | 56                |
| 9      | 203.64                   | 60                |
| 10     | 222.81                   | 64                |
| 11     | 242.53                   | 68                |
| 12     | 262.80                   | 72                |
| 13     | 283.61                   | 76                |
| 14     | 304.97                   | 80                |
| 15     | 326.88                   | 84                |
| 16     | 349.34                   | 88                |
| 17     | 372.34                   | 91                |
| 18     | 395.89                   | 95                |
| 19     | 419.99                   | 99                |
| 20     | 444.64                   | 103               |
| 21     | 469.84                   | 106               |
| 22     | 495.58                   | 110               |
| 23     | 521.87                   | 113               |
| 24     | 548.71                   | 117               |
| 25     | 576.10                   | 121               |
| 26     | 604.03                   | 124               |
| 27     | 632.51                   | 128               |
| 28     | 661.54                   | 131               |
| 29     | 691.12                   | 55                |

**Ilustración 95. Distribución del campo de heliostatos (Fuente: Propia).**



Por lo que, finalmente, hay 2318 heliostatos. Y con esta cantidad se concentrará una radiación en el receptor de:

|                      |        |
|----------------------|--------|
| $Q_{reflejado}$ [MW] | 123,03 |
|----------------------|--------|

Ilustración 96: Calor total que concentramos en el receptor (Fuente: Propia).

Este calor es algo superior al que se necesita concentrar en el receptor (mostrado en la ilustración 88), porque la instalación está dimensionada para un día de verano y a las 12 del mediodía, es decir, unas condiciones óptimas. Y en caso de que se den estas condiciones, siempre se pueden desenfocar los últimos heliostatos para concentrar justo la radiación requerida.

Por lo tanto, la distribución del campo de heliostatos es la que se muestra en la imagen 97 generada mediante el código programado en este trabajo para el diseño de dicho campo (Apéndice 3):

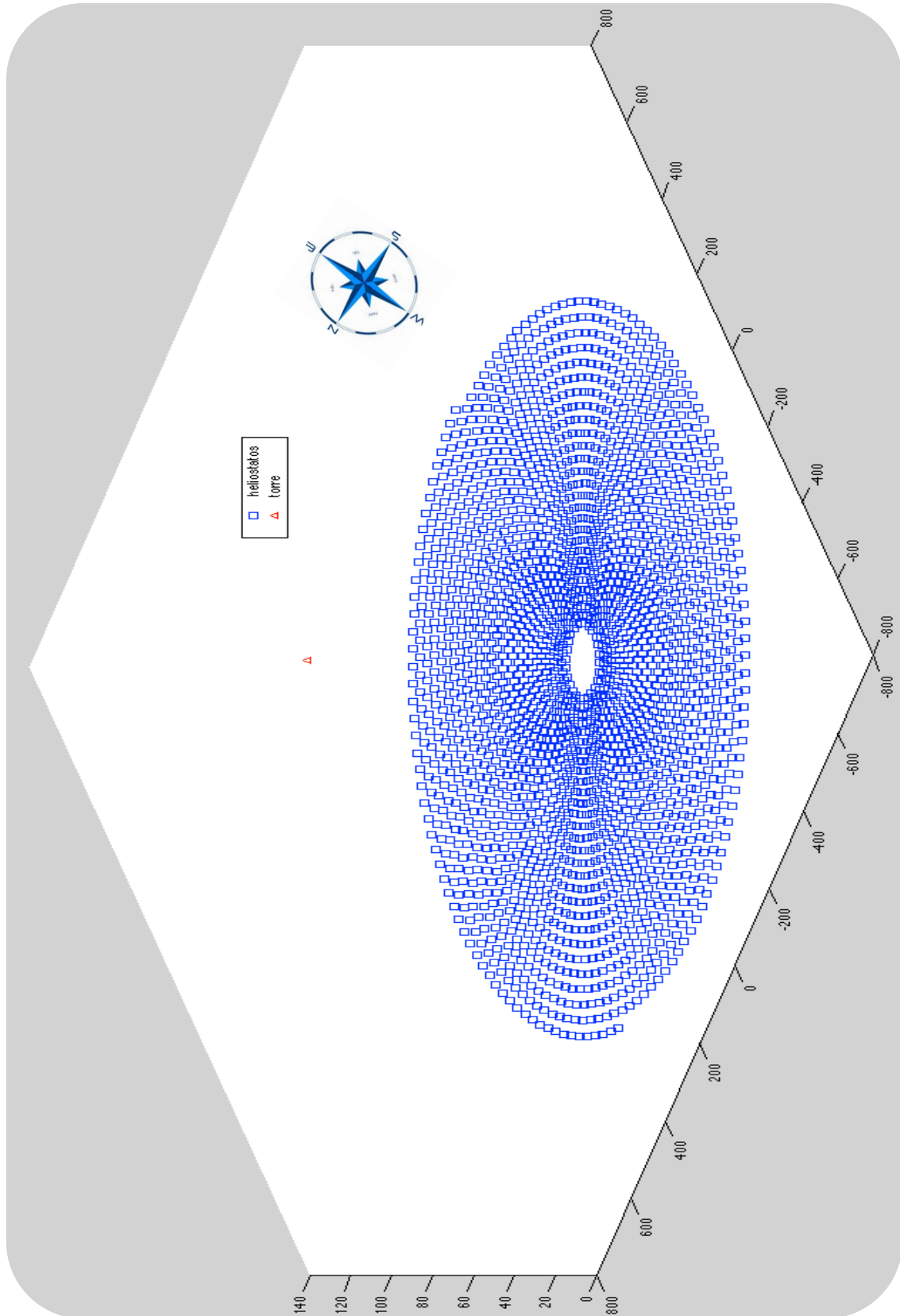


Ilustración 97: Representación del campo de heliostatos (Fuente: Propia).



## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

### 5.1 INVERSIÓN DE LA PLANTA

La tecnología utilizada en el diseño de planta que se propone es realizable porque recurre a elementos y materiales que se utilizan en la actualidad en este u otros contextos, aunque todavía le queda mucho por evolucionar y abaratar costes. Debido a este proceso de cambio en los costes del diseño de la planta vamos a realizar un análisis preliminar de la inversión que conllevaría construir la planta termosolar diseñada.

Para realizar este análisis se dividen los costes de la inversión en las principales áreas de inversión que tiene la planta:

- Campo de heliostatos.
- Torre.
- Isla de potencia.
- Terreno.

#### Campo de heliostatos

Engloba toda la instalación necesaria para que el heliostato como tal funcione: mecanismos de seguimiento, estructura, cimentación, el espejo, adecuar el terreno y el montaje. En la siguiente tabla se recogen los precios estimados del coste de cada elemento si se construyera dicha planta hoy en día, y teniendo en cuenta que son 2318 heliostatos los que forman este campo de heliostatos.

| ELEMENTO               | PRECIO      |
|------------------------|-------------|
| Estructura heliostatos | 9.000.000 € |
| Pedestales             | 1.700.000 € |
| Cimentación            | 7.200.000 € |



|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| <b>Control local</b>              | 12.100.000 €  |
| <b>Mecanismos</b>                 | 25.300.000 €  |
| <b>Reflectores</b>                | 31.000.000 €  |
| <b>Adecuación de tierras</b>      | 8.000.000 €   |
| <b>Montaje</b>                    | 7.200.000 €   |
| <b>Cableado e instrumentación</b> | 11.000.000 €  |
| <b>TOTAL</b>                      | 112.500.000 € |

**Ilustración 98: Desglose del precio del campo de heliostatos (Fuente: Propia).**

Y en la ilustración 99 se observa el peso que tiene cada elemento en el total del precio del campo de heliostatos:



**Ilustración 99: Precio del campo de heliostatos (Fuente: Propia).**

Observando el gráfico anterior, el precio de los reflectores y el de los mecanismos de seguimiento suponen el 50% del precio total de los heliostatos, siendo los dos elementos más caros, y también los más importantes para el correcto funcionamiento del campo de heliostatos.





## Torre

En este apartado se estudia el coste de la torre, que engloba tanto a la propia estructura de la torre como al receptor. En la siguiente tabla se muestra el precio de los dos elementos:

| ELEMENTO | PRECIO       |
|----------|--------------|
| Torre    | 10.000.000 € |
| Receptor | 32.000.000 € |
| TOTAL    | 42.000.000 € |

Ilustración 100: Desglose del precio de la torre (Fuente: Propia).

## Isla de potencia

Se denomina así a la región de la planta termosolar que se encuentra en el centro, rodeada de los heliostatos. Es el lugar donde se encuentra tanto la torre como los componentes del ciclo de potencia. La isla de potencia de la planta Gemasolar se puede apreciar en la ilustración 28, y en la 29 la de Ivanpah.

En la siguiente tabla se recogen los precios de los elementos que forman la isla de potencia de la central termosolar que se va a construir:

| ELEMENTO                                      | PRECIO       |
|---|--------------|
| Obra civil                                    | 6.500.000 €  |
| Equipos mecánicos                             | 36.500.000 € |
| Equipos eléctricos                            | 4.000.000 €  |
| Equipos de instrumentación y control          | 1.200.000 €  |
| Montaje mecánico                              | 5.000.000 €  |
| Montaje eléctrico                             | 2.000.000 €  |
| Montaje de instrumentación y control          | 300.000 €    |
| Conductos, valvulería, aislamiento y soportes | 6.000.000 €  |



|              |                     |
|--------------|---------------------|
| <b>TOTAL</b> | <b>61.500.000 €</b> |
|--------------|---------------------|

Ilustración 101: Desglose de precios de la Isla de Potencia (Fuente: Propia).

A continuación, se observa el peso que tiene cada elemento en el total del precio de la isla de potencia:

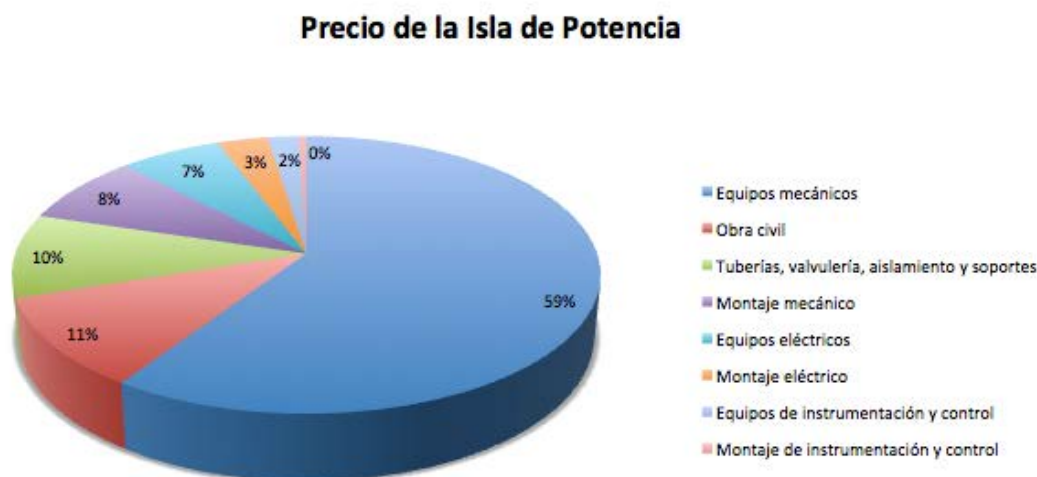


Ilustración 102: Precio de la Isla de Potencia (Fuente: Propia).

Los equipos mecánicos, es decir, turbina, compresor, etc., suponen un 60% del precio total de la isla de potencia, según el gráfico anterior. Estos elementos son la parte más sofisticada e importante en esta parte de la central, ya que son los que obtienen la potencia del calor transmitido al fluido térmico, además de trabajar en las condiciones más exigentes, necesitando materiales especiales para aguantarlas, lo que justifica su elevado precio.

## Terreno

Para calcular cuánto cuesta el terreno necesario para construir la central termosolar, se necesita saber, primero, cuánto terreno es necesario para colocar los heliostatos y la isla de potencia. En la ilustración 95, se ve que se necesita un terreno cuadrado de 1,6 Km de lado, lo que supondrá  $2,56 \text{ Km}^2$  de superficie.



Buscando terrenos de estas dimensiones, se ha llegado a la conclusión de que el precio medio de un terreno de estas características en el emplazamiento elegido, Sevilla, cuesta alrededor de 6 € el  $m^2$ . Así el precio total del terreno que se está buscando sería:

| ELEMENTO | PRECIO       |
|----------|--------------|
| Terreno  | 15.500.000 € |

Ilustración 103: Precio del terreno necesario (Fuente: Propia).

### Inversión total

Finalmente, uniendo todos los precios calculados de cada una de las partes que componen la central, se observa la siguiente tabla:

| ELEMENTO             | PRECIO        |
|----------------------|---------------|
| Campo de heliostatos | 112.500.000 € |
| Torre y receptor     | 42.000.000 €  |
| Isla de potencia     | 61.500.000 €  |
| Terreno              | 15.500.000 €  |
| TOTAL                | 231.500.000 € |

Ilustración 104: Desglose de precios de la planta termosolar (Fuente: Propia).

En la ilustración 105 se observa el peso que tiene cada elemento en el total del precio de la planta termosolar:



### Precio total de la Planta Termosolar

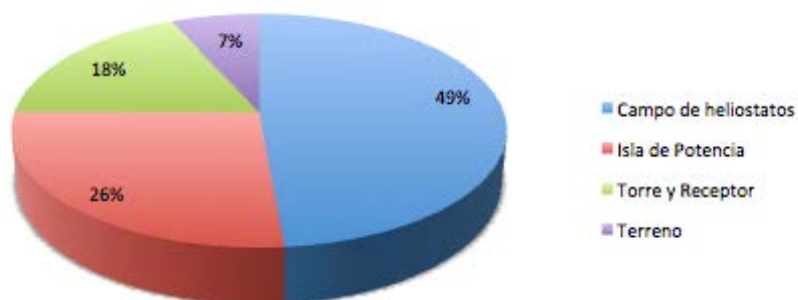


Ilustración 105: Precio total de la Planta Termosolar (Fuente: Propia).

Como muestra el gráfico anterior, el elemento que tiene un mayor peso en el precio total de la planta termosolar es el campo de heliostatos, con casi un 50%, seguido de la isla de potencia. Entre los dos suman los dos las tres cuartas partes de la inversión necesaria para realizar el proyecto diseñado. La cuarta parte restante la componen la torre y el receptor junto con el terreno necesario.



## 5.2 INGRESOS DEL PROYECTO

### Precio del kWh

La energía producida a través de fuentes limpias se denomina como energía generada en régimen especial. Según el Real Decreto 436/04 de 27 de marzo, que es el que establece las categorías dentro del régimen especial, nuestra central termosolar estaría dentro de la siguiente categoría:

- *Categoría b): instalaciones que utilicen como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa, o cualquier tipo de biocarburante, siempre y cuando su titular no realice actividades de producción en el régimen ordinario.*
- *Subgrupo b.1.2 Instalaciones que utilicen como energía primaria para la generación eléctrica la solar térmica. En estas instalaciones se podrán utilizar equipos auxiliares que consuman gas natural o propano únicamente para el mantenimiento de la temperatura del acumulador de calor.*

Una vez clasificada la central, queda saber a cuanto se paga el kWh en esta categoría de centrales. Se supondrá un contexto de precios similares a los establecidos en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo (aunque derogado a finales del año pasado, es la última información que se ha encontrado sobre el precio del kWh para las energías de régimen especial). Este decreto establece los siguientes precios:

| Grupo | Subgrupo | Potencia       | Plazo                | Tarifa regulada<br>c€/kWh | Prima de referencia<br>c€/kWh | Límite<br>Superior<br>c€/kWh | Límite<br>Inferior<br>c€/kWh |
|-------|----------|----------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| b.1   | b.1.1    | P≤100 kW       | primeros 30 años     | 48,8743                   |                               |                              |                              |
|       |          | 100 kW<P≤10 MW | primeros 30 años     | 46,3348                   |                               |                              |                              |
|       |          | 10<P≤50 MW     | primeros 30 años     | 25,4997                   |                               |                              |                              |
|       | b.1.2    |                | primeros 25 años     | 29,8957                   | 28,1894                       | 38,1751                      | 28,1936                      |
|       |          |                | a partir de entonces | 23,9164                   | 22,5515                       |                              |                              |

**Ilustración 106: Tarifas de régimen especial según el Real Decreto 661/2007 de 25 de mayo (Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio).**



Por lo tanto, según la tabla anterior, el precio del kWh sería 28,1895 céntimos de euro. Sabiendo que el número de horas de sol en Sevilla durante todo el año 2013 son 3.400 horas. Y teniendo en cuenta que los cálculos aquí realizados tienen lugar a las 12:00 de un día de verano, extrapolando estos datos al resto del año, se obtendrían unos 57.500 kWh anuales. Obteniendo unos ingresos anuales, debido a la venta del kWh de unos 17 millones de euros anuales.

Este tipo de centrales están construidas para tener una vida útil de unos 40 años, aunque como ninguna central lleva en funcionamiento tantos años, este dato es meramente orientativo. Suponiendo la misma cantidad de horas de sol en un futuro, por lo que la cantidad de ingresos serían los mismos, la inversión empezaría a producir beneficios a partir del año 14: todo lo que produzca a partir de entonces serían beneficios. Se trata de una estimación preliminar, pues un cálculo más preciso debería incluir también los costes de operación y mantenimiento de la planta.



## 6. ANÁLISIS AMBIENTAL

En un proyecto de estas necesidades territoriales, el mayor impacto de una central termosolar se produce sobre el paisaje y en la flora y fauna local. Se emplean casi 3 Km cuadrados de terreno en emplazar el campo de heliostatos, desplazando a la flora y fauna local y, además, se coloca una torre de 140 metros de alto, que es intrusiva en el paisaje pues se puede vislumbrar desde una gran distancia.

El ruido debido a las máquinas mecánicas y eléctricas y la eliminación de la flora en este lugar perturba a la fauna local, obligándola a cambiar de hábitat . Pero cualquier clase de proyecto energético que realizásemos en este emplazamiento produciría también este impacto ambiental.

Lo que distingue a esta clase de energía de las demás es que es una energía limpia ya que, en su producción, no se emite CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por lo tanto, para diferenciar una central termosolar de una central convencional de ciclo combinado de las mismas características de potencia, habría que contabilizar las emisiones de dióxido de carbono.

### Emisiones de CO<sub>2</sub>

En el apartado del análisis económico del proyecto se calculó la cantidad de kWh que produce esta central a lo largo del año, contabilizando las horas de sol recibidas y multiplicándolas por la capacidad de producir potencia de la central; obteniendo un resultado de:

|                    |             |
|--------------------|-------------|
| <b>GWh anuales</b> | <b>57,5</b> |
|--------------------|-------------|

Ilustración 107: Energía producida anualmente (Fuente: Propia).



Y como el rendimiento eléctrico de la central de convencional, usada para estimar el ahorro de CO<sub>2</sub>, es de un 60%, obtenemos que:

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| <b>GWh eléctricos anuales</b> | <b>34,5</b> |
|-------------------------------|-------------|

**Ilustración 108: Energía eléctrica producida anualmente (Fuente: Propia).**

Por cada kWh eléctrico producido mediante gas natural, se emiten a la atmósfera 0,24 Kg de CO<sub>2</sub>. Por lo que usando la central termosolar diseñada en lugar de una central térmica convencional de ciclo combinado se ahorra una cantidad anual de CO<sub>2</sub> igual a:

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas</b> | <b>8.280</b> |
|--|--------------|

**Ilustración 109: Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas (Fuente: Propia).**

Así, produciendo electricidad en esta central, se evita enviar 8 mil toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera algo que ocurriría si se utilizaran métodos tradicionales.





## 7. COSTE DEL PROYECTO

Este apartado estima el coste de realización del informe del presente Trabajo Fin de Grado teniendo en cuenta todo el material, el número de horas y recursos utilizados en la elaboración de los cálculos y del informe.

Para este cálculo se utilizan las siguientes premisas:

- El precio de la hora de trabajo de un ingeniero junior es de 15€/hora.
- Las horas de consulta a un ingeniero senior se pagan a 100€/hora.
- Se considera una amortización de los equipos informáticos en 5 años y con un 5% de interés interanual.
- El coste de la licencia de MATLAB ® para estudiantes es de 69 € repercutida solamente en la fracción de horas utilizada en los cálculos.
- El coste de la licencia de MS Office es de 119 €.
- El coste asociado al resto de gastos generales, es decir, material de oficina, desplazamientos, etc., es un 30% del subtotal del proyecto.

Por lo tanto, partiendo de estas premisas he aquí la siguiente tabla de presupuesto para este proyecto:

| Concepto                           | Cantidad | Precio        | Coste    |
|------------------------------------|----------|---------------|----------|
| Horas de Ingeniero                 | 700 h    | 15 €          | 10.500 € |
| Consultas al director del proyecto | 35 h     | 100 €         | 3.500 €  |
| Equipos informáticos               | 1        | 1100 €        | 253 €    |
| Licencias de software              | 2        | 69 €<br>119 € | 188 €    |
| Material de oficina                | -        | 100 €         | 100 €    |



|              |   |   |                 |
|--------------|---|---|-----------------|
| Otros gastos | - | - | 4.362 €         |
| <b>TOTAL</b> |   |   | <b>18.903 €</b> |

Ilustración 110: Presupuesto del proyecto (Fuente: Propia).

## 8. CONCLUSIONES

### 8.1 RESUMEN DE RESULTADOS

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha diseñado y analizado una central termosolar de 50,5MW de potencia emplazada en Sevilla y optimizada para el día 10 de julio de 2013.

#### Ciclo de potencia

Como ciclo de potencia la central usa un ciclo Brayton sustituyendo la cámara de combustión de una turbina de gas industrial por un receptor solar volumétrico hecho con un material poroso. Como fluido térmico se utiliza aire atmosférico.

La turbina de gas industrial seleccionada para el ciclo es el modelo SGT-800 de la casa Siemens, cuyo comportamiento se muestra en el diagrama T-s del ciclo, ilustración 111:

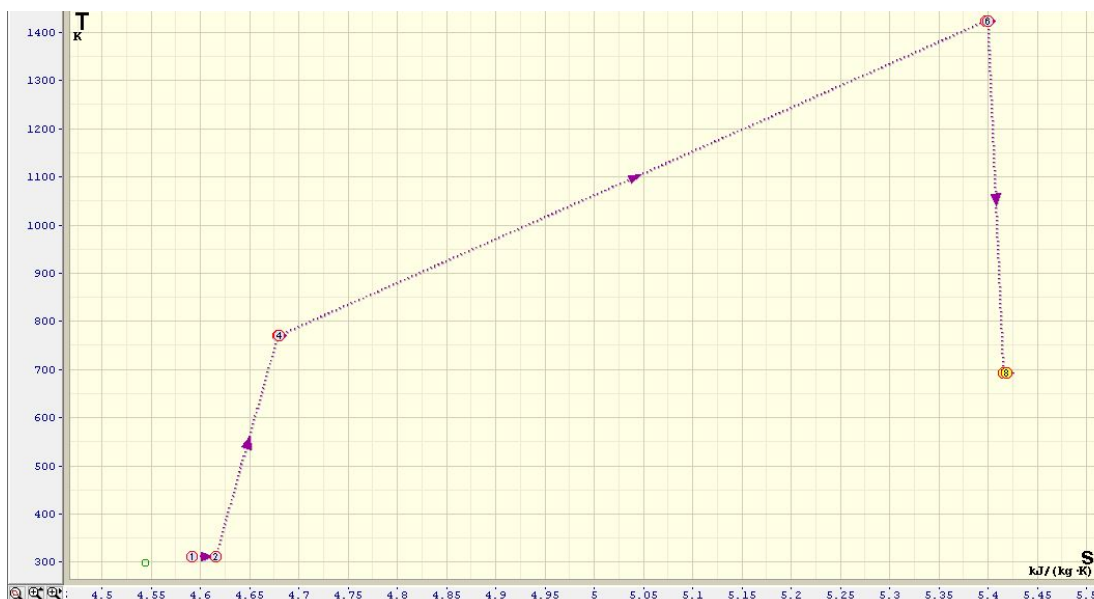


Ilustración 111: Diagrama Ts del ciclo (Fuente: Propia).

Y el siguiente esquema, ilustración 112, muestra los elementos del ciclo diseñado, colocando las propiedades del fluido a la entrada y salida de cada elemento:

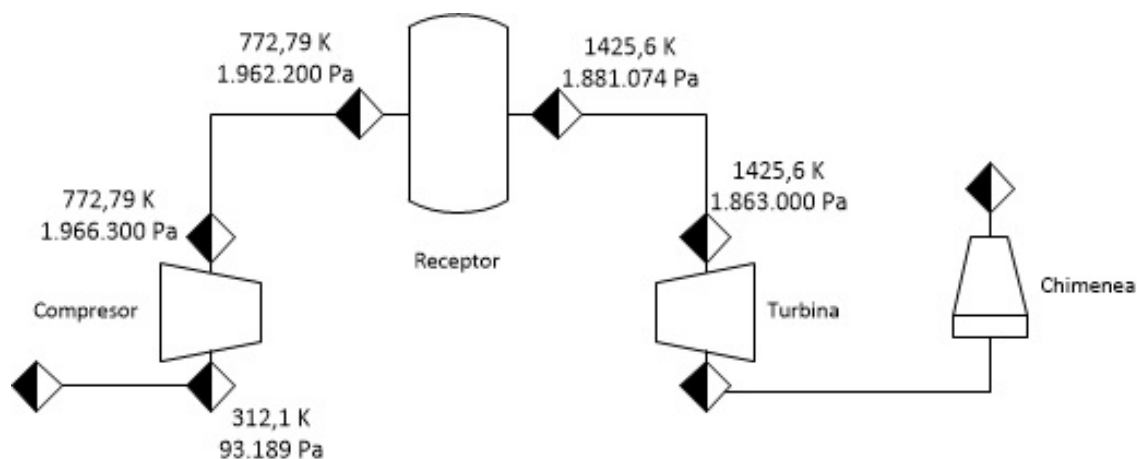


Ilustración 112: Elementos y propiedades del ciclo de potencia (Fuente: Elaboración propia).

### Receptor

Para el diseño del receptor se ha tenido en cuenta la transferencia de calor por convección a través del material poroso, así como por convección y por radiación con el ambiente.

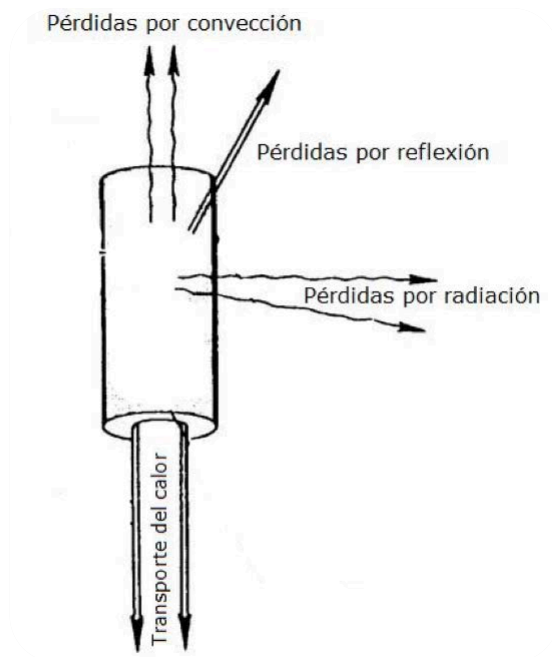


Ilustración 113: Pérdidas de nuestro receptor (Fuente: TFG Alfonso Gómez Cristóbal).

Una vez calculada la transferencia de calor por convección dentro del material poroso, se ha dimensionado el receptor para que pueda aportar el calor necesario que se necesita en el ciclo de potencia, obteniendo las siguientes dimensiones:

|       |      |
|-------|------|
| H [m] | 9,44 |
| D [m] | 4,72 |

**Ilustración 114: Dimensiones del receptor (Fuente: Propia).**

Y, posteriormente, se han calculado las pérdidas que tiene con el ambiente, obteniendo el siguiente gráfico, ilustración 115, de distribución del calor que le llega al receptor:



**Ilustración 115: Distribución del calor concentrado en el receptor (Fuente: Propia).**

Teniendo todo esto en cuenta, se ha calculado todo el calor necesario en el receptor, mediante el campo de heliostatos, para que el ciclo de potencia funcione correctamente.

|                  |       |
|------------------|-------|
| $Q_{total}$ [MW] | 122,0 |
|------------------|-------|

**Ilustración 116: Calor total que necesito en el receptor (Fuente: Propia).**



## Campo de heliostatos

Para diseñar el campo de heliostato es necesario tener en cuenta las pérdidas de radiación que se producen en el heliostato. Son las siguientes:

- Pérdidas en la transmisión a través de la atmósfera
- Pérdidas por sombras
- Pérdidas por bloqueo
- Pérdidas por reflectividad
- Pérdidas en la captación de radiación en el receptor

Se han ido añadiendo heliostatos formando anillos alrededor de la torre hasta concentrar el calor necesario en el receptor obteniendo la siguiente distribución:

| Anillo | Distancia a la torre [m] | Nº de heliostatos |
|--------|--------------------------|-------------------|
| 1      | 70.00                    | 26                |
| 2      | 84.79                    | 31                |
| 3      | 100.12                   | 35                |
| 4      | 116.01                   | 40                |
| 5      | 132.44                   | 44                |
| 6      | 149.42                   | 48                |
| 7      | 166.95                   | 52                |
| 8      | 185.02                   | 56                |
| 9      | 203.64                   | 60                |
| 10     | 222.81                   | 64                |
| 11     | 242.53                   | 68                |
| 12     | 262.80                   | 72                |
| 13     | 283.61                   | 76                |
| 14     | 304.97                   | 80                |
| 15     | 326.88                   | 84                |



|    |        |     |
|----|--------|-----|
| 16 | 349.34 | 88  |
| 17 | 372.34 | 91  |
| 18 | 395.89 | 95  |
| 19 | 419.99 | 99  |
| 20 | 444.64 | 103 |
| 21 | 469.84 | 106 |
| 22 | 495.58 | 110 |
| 23 | 521.87 | 113 |
| 24 | 548.71 | 117 |
| 25 | 576.10 | 121 |
| 26 | 604.03 | 124 |
| 27 | 632.51 | 128 |
| 28 | 661.54 | 131 |
| 29 | 691.12 | 55  |

**Ilustración 117. Distribución del campo de heliostatos (Fuente: Propia).**

### **Análisis económico**

Para analizar la inversión económica en la planta termosolar, se han tenido en cuenta las siguientes partes:

- Campo de heliostatos.
- Torre.
- Isla de potencia.

Y los elementos que forman cada parte, junto con su peso en la inversión que se requiere en cada parte se puede ver en los gráficos de la ilustración 118:



Ilustración 118: Inversiones en las diferentes partes de la central (Fuente: Propia).

Teniendo en cuenta la inversión total, el peso de cada una de estas partes en el precio global de la instalación es el siguiente:

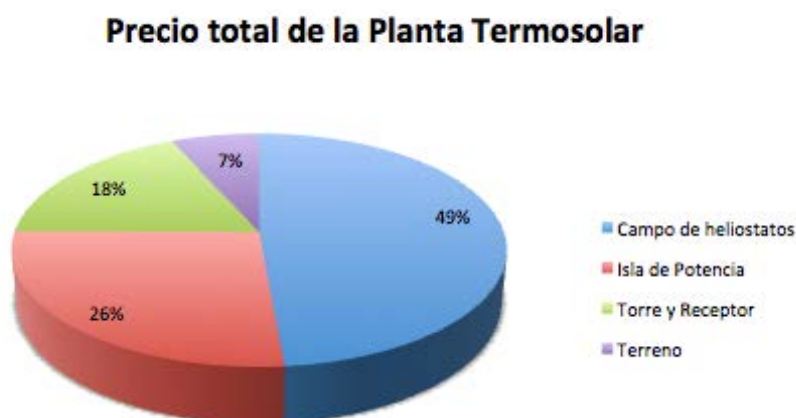


Ilustración 119: Precio total de la Planta Termosolar (Fuente: Propia).

Analizados los gastos, se han calculado los ingresos, según el número de horas de sol anuales. los kWh producidos anualmente y el precio del kWh, por lo que se concluye que cada año se obtienen unos ingresos de:





|                             |           |
|-----------------------------|-----------|
| <b><i>Ingresos [M€]</i></b> | <b>17</b> |
|-----------------------------|-----------|

Ilustración 120: Ingresos en millones de € (Fuente: Propia).

Teniendo en cuenta que estas plantas se diseñan con una vida útil de unos 40 años —aunque ninguna lleva tanto tiempo funcionando como para corroborar este dato—, tras 14 años todos los ingresos serán ganancias, ya que se habrá recuperado la inversión inicial.

### Análisis ambiental

Si esta energía se produjera mediante combustibles fósiles, una vez conocidos los kWh producidos anualmente, se sabría cuánto CO<sub>2</sub> se emite a la atmósfera. Por lo tanto, si producimos esta energía de manera limpia mediante la planta termosolar dejamos de emitir a la atmósfera:

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas</b> | <b>8.280</b> |
|--|--------------|

Ilustración 121: Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas (Fuente: Propia).



## 8.2 CONCLUSIONES FINALES

Como se comentó al principio de este trabajo, el Sol es el recurso que más abunda y del que se puede obtener una energía limpia. El aumento de la demanda de energía y la necesidad de producirla de una forma limpia nos lleva a desarrollar formas alternativas a los combustibles fósiles. Este hecho está impulsando el uso de centrales termosolares, que, aunque todavía tienen mucho que mejorar y necesitan abaratar costes, ya empiezan a ser una alternativa viable a los métodos tradicionales de obtención de energía. Se buscan centrales termosolares térmicamente eficientes, sencillas y con un número reducido de componentes. El diseño propuesto de central termosolar de ciclo Brayton con calentamiento directo de aire en el receptor persigue ese objetivo.

En el capítulo del análisis medioambiental se ve que, si se produce energía mediante este tipo de centrales —las termosolares—, se reduce la emisión de una gran cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, evitando así el aumento del efecto invernadero.

También se ha visto en el análisis económico que, si se cumplen las expectativas de la vida útil de una central, cosa que (cómo se han indicado anteriormente) todavía no se ha podido comprobar ya que ninguna lleva tanto tiempo en funcionamiento, este tipo de producción de energía es en principio muy rentable desde el punto de vista económico. Aunque haya que hacer una gran inversión inicial, la venta de energía devolvería esta inversión en una o dos décadas como sugieren los cálculos mostrados en el trabajo. Esto sería cierto en un entorno de precios moderados o altos de la energía eléctrica, los cuales pueden estar dados por la promoción de la energía solar mediante primas o por el previsible aumento del precio de la energía eléctrica a medio plazo.

Por lo tanto, y a la vista de los resultados económicos y medioambientales, podemos afirmar que la construcción de una central termosolar de las características de la que se ha diseñado en este proyecto es actualmente viable.



Este resultado es coherente con el hecho de que en la actualidad existen varias centrales termosolares funcionando con tecnologías relacionadas, aunque no iguales, a la propuesta en este trabajo.

Además, ante el desarrollo que está sufriendo todas las tecnologías termosolares debido a la necesidad de una alternativa a los combustibles fósiles, los costes de los materiales y elementos utilizados en una planta termosolar irán disminuyendo gradualmente. Por lo tanto, con el tiempo será aún más rentable la producción de energía mediante la explotación del recurso solar.



## 8.3 CRÍTICA A LOS RESULTADOS

Durante la realización del proyecto se han utilizado un conjunto de hipótesis y simplificaciones que facilitan los cálculos que pueden distanciar los resultados de la realidad. La funcionalidad de estas hipótesis reside en que utilizándolas se pueden hacer cálculos preliminares con gran sencillez y sin perder la perspectiva física de las operaciones. A la vista de los resultados obtenidos se revisan a continuación alguna de las hipótesis y simplificaciones que más pueden afectar a los resultados

En el apartado de diseño del ciclo, la geometría de los conductos de aire que unen los elementos del ciclo de potencia han sido simplificados al máximo dado el carácter preliminar de los cálculos. Sin embargo, en etapas más avanzadas del diseño, la geometría y dimensiones más exactas de los conductos de aire pueden dar lugar a caídas de presión en el ciclo Brayton que modifiquen el rendimiento con respecto al inicialmente calculado.

La parte en la que se han utilizado más hipótesis simplificadoras ha sido el receptor. Estas hipótesis se han realizado para facilitar los cálculos, como la hipótesis de que la temperatura del material es constante en todo el receptor, y también por falta de datos contrastados, como la hipótesis del cuerpo gris. Es evidente que un conocimiento preciso de ese dato puede conducir a resultados diferentes de los aquí analizados.

También se utilizaron bastantes hipótesis simplificadoras a la hora de diseñar el campo de heliostatos. Esto se debe a que el objetivo de esta parte era obtener mediante un código propio un diseño genérico del campo y no la optimización del mismo. Pero si no se hubieran utilizado estas simplificaciones habríamos necesitado de un software especializado en el diseño de campos de heliostatos para llevar a cabo este apartado. Probablemente el uso de ese software especializado conduce a un campo de extensión menor para la misma potencia



producida, lo cual reduce el coste asociado al terreno, al total de helióstatos y a su cableado y control.

Debido a todo esto, los resultados obtenidos en el presente Trabajo Fin de Grado son preliminares y para alcanzar una mayor precisión en los mismos sería preciso adentrarse en labores de diseño y análisis en detalle que quedan fuera del alcance de este trabajo.



## 8.4 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Como futuras líneas de trabajo, lo que se propone es el estudio por separado cada uno de los elementos que componen la planta termosolar, eliminando las hipótesis que se han tomado en este trabajo para simplificar los cálculos, y simulando cada elemento en un software especializado en cada elemento para obtener unos resultados y conclusiones más precisos.

A continuación se muestran algunos ejemplos de estudios en detalle que se proponen

Para futuros trabajos el ciclo de potencia podría simularse en un software específico, como es CyclePad, para analizar como responde el ciclo ante distintas condiciones de operación. Otra posible alternativa es estudiar como variaría el rendimiento del ciclo Brayton si se le introducen procesos adicionales como regeneración, recalentamiento o refrigeración intermedia de la compresión.

Un estudio en detalle del receptor debería analizar la variación radial y axial de la temperatura en el mismo por efecto de la transferencia de calor en condiciones de caudales elevados de gas y por efecto de grandes pérdidas calor hacia el exterior. Para ello podrían usarse códigos CFD como ANSYS Fluent, capaces de simular la transferencia de calor en un material poroso con flujo de gas en su interior.

Y con respecto al campo de heliostatos se puede aplicar el mismo criterio que con el receptor, es decir, simularlo en un software especializado para estudiarlo más en profundidad mediante la inclusión de datos más precisos de sombras, rendimientos ópticos, etc. Dicho software, unido a una información meteorológica más precisa, permitiría el estudio detallado de la eficiencia del campo para cada una de las horas de todos los días del año.



Además se podría estudiar la inclusión de un sistema de almacenamiento térmico a la planta para mejorar su funcionamiento en épocas de poco sol, o incluso por la noche. Sin embargo, ese sistema plantea el reto de la utilización de un medio de acumulación, como por ejemplo un fluido secundario de cambio de fase, sistemas de bombeo o presurización de aire, que aumentarían la complejidad de la planta.



## APÉNDICE 1

A continuación se muestra el script de Matlab que se ha utilizado para resolver los rendimientos isentrópicos de la turbina y del compresor del ciclo diseñado en el proyecto.

```
close all
clear all
clc

%Cargamos la tabla de propiedades del aire

load Propiedades.mat

%Datos del fabricante

W_neto = 50.5*10^6; %[W]
T_1 = 30+273; %[K]
T_4 = 553+273; %[K]
r_p = 21.1; %[-]
ma = 134.2; %[kg/s]
ef_total = 0.383; %[-]

%Definimos la ecuacion

eq_rend = @(W_neto,ef_total,ma,Cp_4,Cp_1,T_1,T_4,b,a)
ef_total*ma*(Cp_4*T_4*a-Cp_1*T_1*b)-W_neto;

%Definimos el bucle para el calculo de las propiedades

maxiter = 100000;
tol = 1*10^-6;

ef_isen_c = [0.01:0.01:1]';
ef_isen_t = ef_isen_c.*0;
ef_isen_t_old = ef_isen_t;

for i = 1:100

    iter = 0;
    inc = 1;

    while ((inc>tol) & (iter<maxiter))
```





```
ef_isen_t_old(i)=ef_isen_t(i);

%Calculamos las propiedades

Cp_1 = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,3),T_1);
Cp_4 = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,3),T_4);

Cv_1 = interp1(airTab(:,1), airTab(:,9),T_1);
Cv_4 = interp1(airTab(:,1), airTab(:,9),T_4);

gamma_1 = Cp_1/Cv_1;
gamma_4 = Cp_4/Cv_4;

%Calculamos los parametro a y b

b(i) = ((r_p^((gamma_1-1)/gamma_1))-1)/ef_isen_c(i);
a(i) = (1/(1-ef_isen_t(i)*(1-r_p^((1-gamma_4)/gamma_4))))-1;

a(i) = fzero(@(x) eq_rend
(W_netto,ef_total,ma,Cp_4,Cp_1,T_1,T_4,b(i),x),a(i));

ef_isen_t(i) = (1-(1/(a(i)+1)))/(1-r_p^((1-gamma_4)/gamma_4));

%Calculamos incremento para ver si finalizamos el bucle

inc = abs(ef_isen_t_old-ef_isen_t);

iter = iter+1;

end

end

figure(1)
subplot(111);
plot(0.01:0.01:1,ef_isen_t,'g');
hold on;
plot(0.01:0.01:1,ef_isen_c,'r');
hold off;box on, grid on;
xlabel('Eficiencia del compresor');
ylabel('Rendimiento')
```



## APÉNDICE 2

Este es el script de matlab que se ha utilizado para resolver el ciclo de potencia de la central termosolar.

```
#####CICLO DE POTENCIA#####

clc
close all
clear all

%Cargamos la tabla de propiedades del aire

load Propiedades.mat

%Necesito definir la funcion de colebrook para calcular las perdidas
%primarias de carga que voy a tener a lo largo del ciclo

colebrook = @(Re,rr,la)
1/sqrt(abs(la))+2*log10(rr/3.71+2.51/(Re*sqrt(abs(la))));

%Datos

g = 9.81;
L_torre = 140;
rug = 2.4e-6; %[m]
ma = 134.2; %[kg/s]
v_tubo = 10; %[m/s]

#####
%%%COMPRESOR%%%
#####

%Propiedades del ambiente

T_1_atm = 39.2+273; %[K]
P_1_atm = 101420; %[Pa]
v_atm = 9; %[m/s] Sacado de la velocidad medio del viento en Madrid

%ENTRADA AL COMPRESOR

%Etapa de admision

rho_atm = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_1_atm);

D_0 = sqrt(4*ma/(rho_atm*v_atm*pi));

%Filtro
```



```
AP_c_filtro = 0.15*9.81*rho_atm;

%Colector de admision

v_c = 100; %[m/s]

D_c = sqrt(v_atm*D_0^2/v_c);

K_contraccion_e_c = 0.46;

P_1 = P_1_atm-AP_c_filtro+0.5*rho_atm*(v_atm^2-v_c^2)-
0.5*rho_atm*v_c^2*(K_contraccion_e_c);

AP_entrada_comp = -(-AP_c_filtro+0.5*rho_atm*(v_atm^2-v_c^2)-
0.5*rho_atm*v_c^2*(K_contraccion_e_c));

T_1 = T_1_atm;

%Datos del Fabricante del Compresor

r_c = 21.1; %[-]

%Calculamos la presion de salida del compresor ideal

P_2_c = P_1*r_c;

%Hacemos un bucle para que la Cp_c sea mas precisa, y la calculemos
con la
%temperatura real en vez de con la ideal

maxiter = 1000;
tol = 1e-6;
iter = 0;
inc = 1;

while ((inc>tol) && (iter<maxiter))

    if iter == 0;

        T_2_it = 550;

    else
        T_2_it = T_2;
    end

    %Calculamos el trabajo ideal del compresor

    T_c = (T_1+T_2_it)/2;
```



```
Cp_c = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,3),T_c);
Cv_c = interp1(airTab(:,1), airTab(:,9),T_c)*10^3;
gamma_c = Cp_c/Cv_c;

T_2i = T_1*(P_1/P_2_c)^((1-gamma_c)/gamma_c);
W_c_ideal = ma*Cp_c*(T_1-T_2i);

%Rendimiento del compresor

ef_c = 0.9; %[-] %Por lo que el rendimiento de la turbina es de
0.9397

%Calculamos el trabajo real del compresor

W_c = W_c_ideal/ef_c;

%Calculamos la temperatura real de salida del compresor

T_2 = T_1-W_c/(ma*Cp_c);

inc = abs(T_2-T_2_it);

iter = iter+1;

end

%SALIDA DEL COMPRESOR

%Linea de ascenso a la torre

rho_t_subida = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_2);
mu_t_subida = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,4),T_2);
L_t_subida = L_torre;
D_t_subida = sqrt(4*ma/(rho_atm*v_tubo*pi));

Re_subida = (rho_t_subida*v_tubo*D_t_subida)/mu_t_subida;
rr_subida = rug/D_t_subida;

la_t_subida = 0.25/(log10(rr_subida/3.71)).^2;

la_t_subida = fzero(@(x)colebrook(Re_subida,rr_subida,x),la_t_subida);

%Codo

K_codo1_subida = 0.95;

%Tramos recto

D_t_recto = sqrt(4*ma/(rho_atm*v_tubo*pi));
L_t_recto = D_t_recto;

%Codo

K_codo2_subida = 0.95;
```



```
%Difusor

D_tubo_despues_compresor = sqrt(v_c*D_c^2/v_tubo);

rho_compresor_salida = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_2);
lambda = 0.14;

K_difusor_compresor = lambda*(1-(D_c^2)/(D_tubo_despues_compresor^2));

P_2_r = P_2_c+0.5*rho_t_subida*(v_c^2-v_tubo^2)+rho_t_subida*g*(-
L_torre)-
0.5*rho_t_subida*v_c^2*(la_t_subida*(L_t_subida/D_t_subida+L_t_recto/D
_t_recto)+K_codo1_subida+K_codo2_subida+K_difusor_compresor);
%aplicando bernuilli en el colector

AP_comp_rec = -(0.5*rho_t_subida*(v_c^2-v_tubo^2)+rho_t_subida*g*(-
L_torre)-
0.5*rho_t_subida*v_c^2*(la_t_subida*(L_t_subida/D_t_subida+L_t_recto/D
_t_recto)+K_codo1_subida+K_codo2_subida+K_difusor_compresor));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%RECEPTOR%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Estimaciones

v_r=10; %[m/s]
H=6; %[m]
D=3; %[m]

%Propiedades del material

porosity = 0.75; [%]
ds = 0.002; %[m]

Ls = ds/2.828;

df = 0.5;

df = fsolve(@(df)(1-
(9.425/(8*sqrt(2)))*(df/Ls)^2)+((3.33/(8*sqrt(2)))*(df/Ls)^2)-
porosity, 0.01);

dp = df/(1.18*(sqrt((1-porosity)/(3*pi)))*(1/(1-exp(-(1-
porosity)/0.04)))));

T_sup = 1100+273; %[K]

T_in = T_2; %[K]
```



```
T_out = 1391; %[K]
T_r = (T_in+T_out)/2; %[K]

%Perdida de carga
rho_r = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_r);
mu_r = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,4),T_r);

Re_p = rho_r*v_r*H/mu_r; %aquí hay que mirar que distancia poner, si
es dp o H

AP_receptor = ((150*((1-porosity)/Re_p)+1.75)*H*(rho_r*v_r^2)*(1-
porosity))/((porosity^3)*dp);

P_3_r = P_2_r-AP_receptor;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%TURBINA%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

v_t = 120; %[m/s]

%ENTRADA A LA TURBINA

rho_t_bajada = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_2); %mirar como
puedo hacer esto
mu_t_bajada = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,4),T_2);

%Codo

K_codo1_bajada = 0.95;

%Tramos recto

L_t_bajada = L_torre;
D_t_bajada = sqrt(4*ma/(rho_atm*v_tubo*pi));

Re_bajada = (rho_t_bajada*v_tubo*D_t_bajada)/mu_t_bajada;
rr_bajada = rug/D_t_bajada;

la_t_bajada = 0.25/(log10(rr_bajada/3.71)).^2;

la_t_bajada = fzero(@(x)colebrook(Re_bajada,rr_bajada,x),la_t_bajada);

la_t_recto = la_t_bajada;

%Codo

K_codo2_bajada = 0.95;

%Estrechamiento para adecuar la velocidad a la turbina

D_t = sqrt(v_tubo*D_t_bajada^2/v_t);
```



```
K_contraccion_e_t = 0.44;

P_3_t = P_3_r+0.5*rho_atm*(v_tubo^2-v_t^2)+rho_t_bajada*g*(-L_torre)-
0.5*rho_t_bajada*v_t^2*(la_t_bajada*(L_t_bajada/D_t_bajada+L_t_recto/D
_t_recto)+K_codo1_bajada+K_codo2_bajada+K_contraccion_e_t); %aplicando
bernoulli en el colector

AP_rec_turb = -(0.5*rho_atm*(v_tubo^2-v_t^2)+rho_t_bajada*g*(-
L_torre)-
0.5*rho_t_bajada*v_t^2*(la_t_bajada*(L_t_bajada/D_t_bajada+L_t_recto/D
_t_recto)+K_codo1_bajada+K_codo2_bajada+K_contraccion_e_t));

%Datos de salida

W_neto = 50.5*10^6; %[W]

%Calculamos el trabajo real que necesitamos sacar de la turbina

W_t = W_neto+abs(W_c);

%Calculamos temperaturas y presiones en la turbina

iter3 = 0;
inc3 = 1;

while ((inc3>tol) && (iter3<maxiter))

    if iter3 == 0;

        P_4_it = 101325; %[Pa]

    else

        P_4_it = P_4_t;

    end

    r_t = P_3_t/P_4_it;

    ef_t = 0.9397;

    %Hacemos un bucle para que la Cp_t sea mas precisa, y la
    calculemos con la
    %temperatura real en vez de con una que nos inventemos

    iter2 = 0;
    inc2 = 1;

    while ((inc2>tol) && (iter2<maxiter))

        if iter2 == 0;

            T_3_it = 1100;
```



```
T_4_it = 500;

else
    T_3_it = T_3;
    T_4_it = T_4;
end

%Calculamos la temperatura de entrada a la turbina

T_t = (T_3_it+T_4_it)/2;
Cp_t = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,3),T_t);
Cv_t = interp1(airTab(:,1), airTab(:,9),T_t)*10^3;
gamma_t = Cp_c/Cv_c;

T_3 = W_t/(ma*Cp_t*(ef_t*(1-r_t^((1-gamma_t)/gamma_t))));

T_4 = T_3*(1+ef_t*(r_t^((1-gamma_t)/gamma_t)-1));

inc_a = abs(T_3-T_3_it);
inc_b = abs(T_4-T_4_it);

inc2 = max(inc_a,inc_b);

iter2 = iter2+1;

end

W_t_i = W_t/ef_t;

T_4_i = T_3-(W_t_i)/(ma*Cp_t);

P_4_t = P_3_t*(T_3/T_4_i)^(gamma_t/(1-gamma_t));

inc3 = abs(P_4_t-P_4_it);

iter3 = iter3+1;

end

%SALIDA DE LA TURBINA

%Difusor

D_tubo_despues_turbina = sqrt(v_t*D_t^2/v_tubo);

rho_turbina_salida = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_4);

lambda = 0.14;

K_difusor_turbina = lambda*(1-(D_t^2)/(D_tubo_despues_turbina^2));

%Chimenea
```





```
%Codo chimenea

K_codo_chimenea = 0.95;

%Chimenea como tal

rho_chimenea = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_4);
mu_chimenea = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,4),T_4);

L_chimenea = 10; %[m]
D_chimenea = sqrt(4*ma/(rho_chimenea*v_tubo*pi));

Re_chimenea = (rho_chimenea*v_tubo*D_chimenea)/mu_chimenea;
rr_chimenea = rug/D_chimenea;

la_chimenea = 0.25/(log10(rr_chimenea/3.71)).^2;

la_chimenea =
fzero(@(x)colebrook(Re_chimenea,rr_chimenea,x),la_chimenea);

P_salida = P_4_t+0.5*rho_chimenea*(v_t^2-v_tubo^2)+rho_chimenea*g*(-
L_chimenea)-
0.5*rho_chimenea*v_t^2*(la_chimenea*(L_chimenea/D_chimenea)+K_difusor_
turbina+K_codo_chimenea); %aplicando bernuilli en el colector

AP_turb_salida = -(0.5*rho_chimenea*(v_t^2-v_tubo^2)+rho_chimenea*g*(-
L_chimenea)-
0.5*rho_chimenea*v_t^2*(la_chimenea*(L_chimenea/D_chimenea)+K_difusor_
turbina+K_codo_chimenea));
```



## APÉNDICE 3

Este es el script de matlab que se ha utilizado para resolver la transferencia de calor en el receptor.

```
clc
clear all
close all

%%RADIACION
%Cargamos la tabla de propiedades del aire

load Propiedades.mat

%Definimos las temperaturas de entrada y de salida del aire que hemos
%calculado anteriormente

T_entrada = 753.3261;

T_salida = 1406.3;

T_r = (T_entrada+T_salida)/2;

T_atm = 30+273;

T_alr = -25+273;

u_viento = 9;

u_fluido = 10;

g = 9.81;

ma = 134.2; %[kg/s]

%Calculamos el calor que nos hace falta

Cp_aire = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,3),T_r);

Q = ma*Cp_aire*(T_salida-T_entrada);

%Propiedades del material

porosity = 0.75; %[%]

ds = 0.002;

Ls = ds/2.828;
```



```
df = fsolve(@(df)(1-  
(9.425/(8*sqrt(2)))*(df/Ls)^2)+((3.33/(8*sqrt(2)))*(df/Ls)^2)-  
porosity, 0.01);  
  
dp = df/(1.18*(sqrt((1-porosity)/(3*pi)))*(1/(1-exp(-(1-  
porosity)/0.04)))));  
  
Sp = 12*pi*df*Ls/((Ls^3)*(sqrt(2)+sqrt(3))^3);  
  
maxiter = 100;  
tol = 1e-6;  
iter = 0;  
inc = 1;  
  
while ((inc>tol) && (iter<maxiter))  
  
    if iter == 0;  
  
        T_mat_it = 1500;  
        H_it = 8;  
  
    else  
  
        T_mat_it = T_mat;  
        H_it = H;  
  
    end  
  
    %Conduccion a traves del material poroso  
  
    rho_r = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_r);  
    mu_r = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,4),T_r);  
    Cp_r = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,3),T_r);  
    K_r = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,6),T_r);  
  
    u_poro = u_fluido/porosity;  
  
    D_poro = (1-exp(-(1-porosity)/0.04)))*df;  
  
    Re_cond = rho_r*u_poro*D_poro/mu_r;  
  
    Pr_cond = Cp_r*mu_r/K_r;  
  
    Nu_cond = 0.76*(Re_cond^0.4)*(Pr_cond^0.37);  
  
    h_cond = Nu_cond*K_r/D_poro;  
  
    q_cond = h_cond*(T_mat_it-T_r);
```



```
%Conveccion libre (perdidas hacia el exterior por conveccion)

rho_atm = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,2),T_atm);
mu_atm = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,4),T_atm);
Cp_atm = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,3),T_atm);
K_atm = interp1(airTab2(:,1), airTab2(:,6),T_atm);

Re_conv = rho_atm*u_viento*H_it/mu_atm;

Pr_conv = Cp_atm*mu_atm/K_atm;

beta = 1/T_atm;

Gra = (rho_atm^2*g*beta*(T_mat_it-T_atm)*H_it^3)/mu_atm^2;

Ra = Gra*Pr_conv;

Nu_conv =
(0.825+((0.387*(Ra^(1/6)))/((1+(0.429/Pr_conv)^(9/16))^(8/27))))^2;

h_conv = Nu_conv*K_atm/H_it;

q_conv = h_conv*(T_mat_it-T_atm);

%Radiacion (perdidas por radiacion)

emissivity = 0.6;

sigma = 5.67*10^(-8);

q_rad = emissivity*sigma*(T_mat_it^4-T_alr^4);

q = q_rad+q_cond+q_conv;

V = Q/q_cond;

H = (4*V/pi)^(1/3);

D = H/2;

%Recalculamos T_m

T_mat = fsolve(@(T_mat) (((T_mat-T_salida)/(T_mat-T_entrada))-
exp(-(pi*(H^2)*h_cond*H)/(ma*Cp_r))), T_mat_it);

incl = abs(T_mat-T_mat_it);
```



```
inc2 = abs(H-H_it);  
  
inc = max(inc1,inc2);  
  
iter = iter+1;  
  
end  
  
Q_total = q_conv*pi*D*H+q_rad*pi*D*H+Q;  
  
x = 0:0.1:9.4;  
  
for i=1:length(x)  
  
T(i) =T_mat-(exp(-(pi*(H^2)*h_cond*x(i))/(ma*Cp_r)))*(T_mat-  
T_entrada);  
  
T_m(i) = T_mat;  
  
end  
  
plot(x,T)  
hold on  
plot(x,T_m,'r')  
hold off  
xlabel('Longitud del receptor')  
ylabel('Temperaturas')  
legend('Temperatura del fluido','Temperatura del receptor')  
  
H  
D
```



## APÉNDICE 4

Este es el script de matlab que se ha utilizado para resolver el diseño del campo de heliostatos.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%CAMPO DE HELIOSTATOS%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

%Datos de partida

Go = 0.73*711.7; %[W/m^2]

q = 122e6;

L_hel = 5.4772; %[m] La mitad de la altura del heliostato
L_torre = 140; %[m]
A_h = 120; %[m^2]

coord_pol_torre(1,1) = 0;
coord_pol_torre(1,2) = 0;
coord_rect_torre(1,1) = 0;
coord_rect_torre(1,2) = 0;
coord_rect_torre(1,3) = L_torre;

s(1,1) = 0;
s(1,2) = 0;
s(1,3) = 1;

NTH = 0;

maxiter = 100000;
tol = 1*10^-6;

iter = 0;
inc = 1;

q_ref = 0;

circulos = 29;

for i = 1:circulos

    %Calculo de separacion entre circulos

    if i==1
```



```
R(1) = L_torre/2;

else

    R(i) = R(i-1)+sqrt(A_h)*(1.25+i/20);

end

%Numero de heliostatos por anillo

NH(i) = ceil(2*pi*R(i)/((1.5+i/20)*sqrt(A_h)));

for j = 1:NH(i)

    ang_h_f(j,i) = (2*pi*j/NH(i));

end

end

coord_pol = zeros (NTH,2);
coord_rect = zeros (NTH,3);
t = zeros (NTH,3);
tx = zeros (NTH,3);
ty = zeros (NTH,3);
tz = zeros (NTH,3);
phi = zeros (NTH,1);

z = 1;

for i = 1:circulos

    if i==circulos

        for j = 1:NH(i)-80

            if ang_h_f(j,i) == 0;

            else

                coord_pol(z,1) = ang_h_f (j,i);
                coord_pol(z,2) = R(i);

                coord_rect(z,1) = R(i)*cos(ang_h_f (j,i));
                coord_rect(z,2) = R(i)*sin(ang_h_f (j,i));
                coord_rect(z,3) = L_hel;

                tx(z) = coord_rect_torre(1,1)-coord_rect(z,1);
                ty(z) = coord_rect_torre(1,2)-coord_rect(z,2);
                tz(z) = coord_rect_torre(1,3)-coord_rect(z,3);

                arg(z) = sqrt(tx(z)^2+ty(z)^2+tz(z)^2);

                t(z,1) = tx(z)/arg(z);
```



```
t(z,2) = ty(z)/arg(z);
t(z,3) = tz(z)/arg(z);

k = [t(z,1); t(z,2); t(z,3) ];

phi(z) = 0.5*acosd(k'*s');

q_ref = q_ref+0.73*Go*A_h*abs(cosd(phi(z)));

z = z+1;

end

end

else

for j = 1:NH(i)

if ang_h_f(j,i) == 0;

else

coord_pol(z,1) = ang_h_f (j,i);
coord_pol(z,2) = R(i);

coord_rect(z,1) = R(i)*cos(ang_h_f (j,i));
coord_rect(z,2) = R(i)*sin(ang_h_f (j,i));
coord_rect(z,3) = L_hel;

tx(z) = coord_rect_torre(1,1)-coord_rect(z,1);
ty(z) = coord_rect_torre(1,2)-coord_rect(z,2);
tz(z) = coord_rect_torre(1,3)-coord_rect(z,3);

arg(z) = sqrt(tx(z)^2+ty(z)^2+tz(z)^2);

t(z,1) = tx(z)/arg(z);
t(z,2) = ty(z)/arg(z);
t(z,3) = tz(z)/arg(z);

k = [t(z,1); t(z,2); t(z,3) ];

phi(z) = 0.5*acosd(k'*s');

q_ref = q_ref+Go*A_h*abs(cosd(phi(z)));

z = z+1;

end

end

end

end
```





$NTH = z;$

```
plot3(coord_rect(:,1),coord_rect(:,2),coord_rect(:,3),'s');  
hold on  
plot3(coord_rect_torre(1,1),coord_rect_torre(1,2),coord_rect_torre(1,3),  
'^r')  
legend('heliostatos','torre')
```



## BIBLIOGRAFÍA

Abengoa solar. Retrieved 22/01, 2014, from

[http://www.abengoasolar.com/web/es/nuestras\\_plantas/plantas\\_en\\_operacion/espana/PS10\\_la\\_primera\\_torre\\_comercial\\_del\\_mundo.html](http://www.abengoasolar.com/web/es/nuestras_plantas/plantas_en_operacion/espana/PS10_la_primera_torre_comercial_del_mundo.html)

Albanakis, C., Missirlis, D., Michailidis, N., Yakinthos, K., Goulas, A., Omar, H., et al. (2009).

Experimental analysis of the pressure drop and heat transfer through metal foams used as volumetric receivers under concentrated solar radiation . *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 246–252. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/etfs](http://www.elsevier.com/locate/etfs)

Ávila-Marín, A. L. (2011).

Volumetric receivers in solar thermal power plants with central receiver system technology: A review *Solar Energy*, 85, 891–910.

Aynat Piquer, A. (2012).

Determinación del ciclo de vapor de una central solar termoeléctrica CCP de 50MW (Universidad Carlos III Madrid).

Barigozzi, G., Bonetti, G., Franchini, G., Perdichizzi, A., & Ravelli, S. (2012).

Thermal performance prediction of a solar hybrid gas turbine *Solar Energy*, 86, 2116–2127.

Behar, O., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2013). A review of studies on central receiver solar

thermal power plants . *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 23, 12–39. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)

Carrillo Lasheras, A. (2013).

Diseño de una planta termosolar de receptor central con almacenamiento de sales fundidas: Estudio de los efectos del sentido de circulación de la sal en el receptor y del desenfoque de los heliostatos del campo. (Universidad Carlos III Madrid).



Coelho, B., Varga, S., Oliveira, A., & Mendes, A. (2014).

Optimization of an atmospheric air volumetric central receiver system: Impact of solar multiple, storage capacity and control strategy *Renewable Energy*, 63, 392-401.

Crespo, L., Ramos, F., & Martínez, F.

Questions and answers on solar central receiver plant design by nspoc

Cui, F. Q., He, Y. L., Cheng, Z. D., Li, D., & Tao, Y. B. (2012).

Numerical simulations of the solar transmission process for a pressurized volumetric receiver *Energy*, 46, 618-628.

de Loizaga Medina, I. (2013).

Comparación de las configuraciones de torre única y multitorre en una planta térmica solar de receptor central operada con sales fundidas y sistema de almacenamiento Universidad Carlos III Madrid).

Fend, T., Schwarzbözl, P., Smirnova, O., Schöllgen, D., & Jakob, C. (2013).

Numerical investigation of flow and heat transfer in a volumetric solar receiver *Renewable Energy*, 60, 655-661.

Fend, T., Hoffschmidt, B., Pitz-Paal, R., Reutter, O., & Rietbrock, P. (2004).

Porous materials as open volumetric solar receivers: Experimental determination of thermophysical and heat transfer properties *Energy*, 29, 823–833.

Fend, T., Pitz-Paal, R., Reutter, O., Bauer, J. r., & Hoffschmidt, B. (2004).

Two novel high-porosity materials as volumetric receivers for concentrated solar radiation *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 84, 291–304.

Gemasolar. Retrieved 02/02, 2014, from <http://es.wikipedia.org/wiki/Gemasolar>

Gómez Cristóbal, A. (2011).

Diseño del campo de heliostatos para torres solares de receptor central Universidad Carlos III Madrid).



Helena Klein, H., Karni, J., Ben-Zvi, R., & Bertocchi, R. (2007). Heat transfer in a directly irradiated solar receiver/reactor for solid–gas reactions. *Solar Energy*, 81, 1227–1239. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)

Ho, C. K., & Iverson, B. D. (2014). Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 835–846.

Incropera, F., & DeWitt, D. *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th edition ed.)

JOGA LÓPEZ, H. (2012). Diseño de una planta termosolar de receptor central con sales fundidas como fluido de trabajo y sistema de almacenamiento. Universidad Carlos III Madrid).

Kalogirou, S. (2009). *Solar energy engineering : Processes and systems* (1st ed ed.)

*Materials and applications guide*. Retrieved 03/11, 2014, from <http://www.ergaerospace.com/Aluminum-properties.htm>

Ortega, J. I., Burgaleta, J. I., & Téllez, F. M. (2008). Central receiver system solar power plant using molten salt as heat transfer fluid. *Journal of Solar Energy Engineering*, 130

Pareja Relaño, I. (2012). Tecnologías de generación en plantas solares de receptor central: Estudio comparativo. Universidad Carlos III Madrid).

*Petróleo | sostén del mundo industrializado*. Retrieved 05/01, 2014, from <http://mc2coruna.org/casa/palabras-de-la-ciencia/petroleo.html>

PITZ-PAAL, R., HOFFSCHMIDT, B., BOHMER, M., & BECKER, M. (1997). Experimental and numerical evaluation of the performance and flow stability of different types of



open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation *Solar Energy*, 60, 135-150.

ps10. Retrieved 02/02, 2014, from <http://es.wikipedia.org/wiki/PS10>

ps20. Retrieved 15/03, 2014, from <http://es.wikipedia.org/wiki/PS20>

*Radiación en sevilla*. Retrieved 22/05, 2014, from  
<http://www.meteoclimatic.com/mapinfo/ESAND>

Real Decreto 661, (2007).

Reynolds, D. J., Jance, M. J., Behnia, M., & Morrison, G. L. (2004). An experimental and computational study of the heat loss characteristics of a trapezoidal cavity absorber . *Solar Energy*, 76, 229–234. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)

Roeb, M., Saßck, J. -, Rietbrock, P., Prah, C., Schreiber, H., Neises, M., et al. (2011). Test operation of a 100 kW pilot plant for solar hydrogen production from water on a solar tower *Solar Energy*, 85, 634–644.

Roldán, M. I., Smirnova, O., Fend, T., Casas, J. L., & Zarza, E. (2014). Thermal analysis and design of a volumetric solar absorber depending on the porosity *Renewable Energy*, 62, 116-128.

Romero-Alvarez, M., & Zarza, E. (2007). Concentrating solar thermal power *Handbook of energy efficiency and renewable energy* (). Plataforma Solar de Almeria-CIEMAT:

Shapiro, H. N., & Moran, M. J. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica* (2nd ed.) Reverte.

Singer, C., Buck, R., Pitz-Paal, R., & Müller-Steinhagen, H. (2010). Assessment of solar power tower driven ultrasupercritical steam cycles applying tubular



central receivers with varied heat transfer media *Journal of Solar Energy Engineering*,  
132

Terrenos en sevilla. Retrieved 20/05, 2014, from <http://www.milanuncios.com/terrenos-en-sevilla/>

El tiempo en sevilla. Retrieved 03/03, 2014, from <http://www.eltiempo24.es/clima/r/Sevilla-ES0SE0093.html>

Torresol energy. Retrieved 03/04, 2014, from  
<http://www.torresolenergy.com/TORRESOL/planta-gemasolar/es>

Veeraragavan, A., Lenert, A., Yilbas, B., Al-Dini, S., & Wang, E. N. (2012). Analytical model for the design of volumetric solar flow receivers . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 556–564. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/ijhmt](http://www.elsevier.com/locate/ijhmt)

Villafán-Vidales, H. I., Abanades, S., Caliot, C., & Romero-Paredes, H. (2011). Heat transfer simulation in a thermochemical solar reactor based on a volumetric porous receiver . *Applied Thermal Engineering*, 31, 3377-3386. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/apthermeng](http://www.elsevier.com/locate/apthermeng)

White, F. M. *Fluid mechanics* (4th edition ed.) McGraw-Hill.

Wu, Z., Caliot, C., Flamant, G., & Wang, Z. (2011). Coupled radiation and flow modeling in ceramic foam volumetric solar air receivers . *Solar Energy*, 85, 2374–2385. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)

Wu, Z., Caliot, C., Flamant, G., & Wang, Z. (2011).  
Numerical simulation of convective heat transfer between air flow  
and ceramic foams to optimise volumetric solar air receiver performances *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 1527–1537.

Wu, Z., & Wang, Z. (2013).  
Fully coupled transient modeling of ceramic foam volumetric solar air receiver *Solar Energy*, 89, 122–133.



Yu, Q., Wang, Z., & Xu, E. (2012).

Simulation and analysis of the central cavity receiver's performance of solar thermal power tower plant *Solar Energy*, 86, 164–174.

Zavoico, A. B. (2001).

*Solar power tower design basis document*. San Francisco, CA 94104: Sandia National Laboratories.